

Trabajo Fin de Máster

Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio de subsidencias urbanas mediante metodología DinSAR y su vinculación con la geología, edificación y nivel freático

Autor: Pablo Monleón Cantalapiedra

Tutora: Cristina Torrecillas Lozano

Departamento de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Departamento de
Ingeniería Gráfica ETSI

Trabajo Fin de Máster
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio de subsidencias urbanas mediante metodología DinSAR y su vinculación con la geología, edificación y nivel freático

Autor:

Pablo Monleón Cantalapiedra

Tutora:

Cristina Torrecillas Lozano

Profesora Titular de Universidad

Departamento de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: Estudio de subsidencias urbanas mediante metodología DinSAR y su vinculación con la geología, edificación y nivel freático

Autor: Pablo Monleón Cantalapiedra
Tutora: Cristina Torrecillas Lozano

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Índice

<i>Índice de Figuras</i>	III
<i>Índice de Tablas</i>	VII
<i>Bibliography</i>	IX
<i>Resumen</i>	XIII
<i>Abstract</i>	XV
1 Introducción	1
1.1 Subsidiencias urbanas	1
1.1.1 Concepto de subsidencia y sus causas	1
1.1.2 Marco actual del riesgo de subsidencias	4
1.2 La teledetección en la detección de subsidencias	4
1.2.1 La Agencia Espacial Europea	4
1.2.2 Programa Copernicus	5
1.2.3 Misiones Sentinel	6
1.2.4 Obtención de productos Sentinel-1	8
1.2.5 Metodología DinSAR y su uso en subsidencias	9
1.3 Emplazamientos estudiados	10
1.3.1 Granada	10
1.3.2 Lorca	11
1.3.3 Almería	12
1.4 Objetivos	12
2 Datos de partida	15
2.1 Imágenes Sentinel 1	15
2.2 Catastro	16
2.3 Geología	18
2.4 Meteorología	20
2.5 Nivel Freático	22
3 Metodología	25
3.1 Marco teórico del cálculo DinSAR	25
3.1.1 Metodologías InSAR y DinSAR	26
3.1.2 Metodología PSI	28
3.2 Software SARPROZ	28
3.2.1 Preparación de la información	29
3.2.2 Análisis Preliminar	31
3.2.3 Estimación de la Pantalla de Fase Atmosférica	31
3.2.4 Análisis Multi-imagen	32
3.2.5 Procesamiento de Resultados	33

4	Resultados experimentales	35
4.1	Desplazamientos del terreno en SARPROZ	35
4.1.1	Granada	36
4.1.2	Lorca	37
4.1.3	Almería	39
4.2	Correlación con la litología existente	40
4.3	Estudio de los resultados en función de la antigüedad y peso de las edificaciones	45
4.4	Tendencia del terreno y relación con la piezometría	48
4.5	Análisis visual de datos correlacionados	51
5	Conclusiones	53

Índice de Figuras

1.1	Subsidencias causadas por a) disolución subterránea, b) construcción de obras subterráneas, c) erosión subterránea, d) por flujo lateral de rocas salinas o de e) arcillas, y por f) tectónica (Tomás, 2009)	2
1.2	Subsidencias causadas por compactación debidas a a) cargas, b) vibración, c) extracción de fluidos o d) hidrocompactación (Tomás, 2009)	3
1.3	En la imagen superior se aprecia un mapa mundial donde el color indica los intervalos de probabilidad de muy bajo (verde oscuro) a muy alto (rojo intenso). En la imagen inferior, se representa la Península Ibérica en detalle. Fuente: Mapping the global threat of land subsidence, Science Magazine (2021)	4
1.4	Logotipo oficial de la Agencia Espacial Europea. Fuente: ESA, 2021	5
1.5	Logotipo oficial del Programa Copernicus. Fuente: ESA, 2021	6
1.6	Seis áreas de estudio del Programa Copernicus. Fuente: ESA, 2021	6
1.7	Satélites Sentinel en funcionamiento en la actualidad. Fuente: www.elpais.com , 2017	8
1.8	Algunos datos de interés correspondientes con el satélite Sentinel 1. Fuente: ESA, 2021	8
1.9	Toma de datos del satélite Sentinel 1. Fuente: ESA, 2021	9
1.10	En rojo, las provincias españolas que se analizarán en el presente Trabajo Fin de Máster	10
1.11	Municipio de Granada (provincia de Granada) en rosa, donde aparecen representados los principales cursos fluviales en azul y la red de carreteras y viario urbano existente en la ciudad en negro	11
1.12	Municipio de Lorca (Región de Murcia) en verde, donde aparecen representados los principales cursos fluviales en azul y la red de carreteras y viario urbano existente en la ciudad, en negro	11
1.13	Municipio de Almería en amarillo, donde aparecen representados los principales cursos fluviales en azul y la red de carreteras y viario urbano existente en la ciudad, en negro	12
2.1	Ejemplo de actuación del motor de búsqueda de imágenes satelitales en la web de la ESA	16
2.2	Ventana de descarga del motor de búsqueda de la información catastral INSPIRE	17
2.3	Edificaciones existentes en la ciudad de Granada en función de su año de construcción	17
2.4	Edificaciones existentes en la ciudad de Lorca en función de su año de construcción	18
2.5	Edificaciones existentes en la ciudad de Almería en función de su año de construcción	18
2.6	Mapa de Movimientos Verticales del Terreno. Escala 1:1.000.000. Fuente: IGME	19
2.7	Principales litologías presentes en el Municipio de Granada. Fuente: IGME	19
2.8	Principales litologías presentes en el Municipio de Lorca. Fuente: IGME	20
2.9	Principales litologías presentes en el Municipio de Almería. Fuente: IGME	20
2.10	Climogramas y pluviogramas de las ciudades de Granada, Lorca y Almería Fuente: en.climate-data.org	21

2.11	Precipitaciones media mensual en el intervalo 2018-2021 en la ciudad de Granada. Fuente: AEMET	21
2.12	Precipitaciones media mensual en el intervalo 2018-2021 en la ciudad de Lorca. Fuente: AEMET	22
2.13	Precipitaciones media mensual en el intervalo 2018-2021 en la ciudad de Almería. Fuente: AEMET	22
2.14	Emplazamiento de los tres sondeos analizados en cada una de las ciudades	23
2.15	Profundidad del nivel piezométrico para el sondeo situado en Granada	23
2.16	Profundidad del nivel piezométrico para el sondeo situado en Lorca	24
2.17	Profundidad del nivel piezométrico para el sondeo situado en Almería	24
3.1	Metodologías SAR	25
3.2	Bandas de frecuencia satelitales. Fuente: ESA	26
3.3	Esquema de adquisición de datos en caso de subsidencia. Principio básico DInSAR. (Fuente: Sousa, 2013)	26
3.4	Funcionamiento de la metodología PSI. Los píxeles en rosa son los que cuentan con sólidas referencias altimétricas, las cuales no son susceptibles de cambio brusco en el tiempo. (Fuente: Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) in monitoring slope movements in Nainital, Uttarakhand Lesser Himalaya, India. Yhokha y Goswami, 2018)	27
3.5	Resumen de la Metodología SARPROZ. Fuente: Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic (Farova, 2019)	28
3.6	Software SARPROZ, creado por Daniele Perissin, investigador en la Purdue University (Indiana, EEUU) y en la Universidad Politécnica de Milán (Italia)	29
3.7	División de una imagen radar IW en tres subsurcos. Fuente: Diapositivas utilizadas en un workshop organizado por la ESA en Roma los días 23-27 de marzo de 2015	29
3.8	Imagen S1A _ IW _ SLC _ 1SDV _ 20180523T061845 _ 20180523T061912 _ 022028 _ 026157 _ 8426 representada en Google Earth	30
3.9	Recintos analizados en las tres localizaciones, en función de la orientación escogida	30
3.10	Módulo APS del software SARPROZ.	31
3.11	Módulo Sparse Points processing del software SARPROZ	32
3.12	Desplazamientos sufridos por el terreno bajo el nodo 26106 en la ciudad de Almería, entre los años 2018 y 2021	33
4.1	Desplazamientos 2018-2021 en Almería para cada una de sus dos órbitas. En la parte derecha la órbita ascendente, y en la izquierda la descendente	35
4.2	Desplazamientos 2018-2019 en Granada, en mm	36
4.3	Desplazamientos 2018-2020 en Granada, en mm	36
4.4	Desplazamientos 2018-2021 en Granada, en mm	37
4.5	Desplazamientos 2018-2019 en Lorca, en mm	37
4.6	Desplazamientos 2018-2020 en Lorca, en mm	38
4.7	Desplazamientos 2018-2021 en Lorca, en mm	38
4.8	Desplazamientos 2018-2019 en Almería, en mm	39
4.9	Desplazamientos 2018-2020 en Almería, en mm	39
4.10	Desplazamientos 2018-2021 en Almería, en mm	40
4.11	Puntos analizados bajo sobre los cuales existe subsidencia o hinchamiento en la ciudad de Granada	41
4.12	Puntos analizados bajo sobre los cuales existe subsidencia o hinchamiento en la ciudad de Lorca	41
4.13	Puntos analizados bajo sobre los cuales existe subsidencia o hinchamiento en la ciudad de Almería	41
4.14	Georrepresentación de los desplazamientos medidos entre 2018 y 2021 sobre las litologías en Granada	42
4.15	Georrepresentación de los desplazamientos medidos entre 2018 y 2021 sobre las litologías en Lorca	42

4.16	Georrepresentación de los desplazamientos medidos entre 2018 y 2021 sobre las litologías en Almería	43
4.17	Histograma de frecuencias de desplazamientos medidos clasificados según cada una de las litologías presentes en la ciudad de Granada	43
4.18	Histograma de frecuencias de desplazamientos medidos clasificados según cada una de las litologías presentes en la ciudad de Lorca	44
4.19	Histograma de frecuencias de desplazamientos medidos clasificados según cada una de las litologías presentes en la ciudad de Almería	44
4.20	Extracción de puntos sobre edificaciones en la ciudad de Granada	45
4.21	Extracción de puntos sobre edificaciones en la ciudad de Lorca	46
4.22	Extracción de puntos sobre edificaciones en la ciudad de Almería	46
4.23	Nube de puntos relacionando la antigüedad y peso de las edificaciones con los movimientos del terreno que sufren en Granada	47
4.24	Nube de puntos relacionando la antigüedad y peso de las edificaciones con los movimientos del terreno que sufren en Lorca	47
4.25	Nube de puntos relacionando la antigüedad y peso de las edificaciones con los movimientos del terreno que sufren en Almería	47
4.26	En la columna de la izquierda, las edificaciones que han sufrido mayor subsidencia. En la de la derecha, las edificaciones más antiguas	48
4.27	Localización de la medición piezométrica y de los puntos obtenidos en SARPROZ que van a estudiarse en la Ciudad de Granada	49
4.28	Localización de la medición piezométrica y de los puntos obtenidos en SARPROZ que van a estudiarse en la Ciudad de Lorca	49
4.29	Localización de la medición piezométrica y de los puntos obtenidos en SARPROZ que van a estudiarse en la Ciudad de Almería	50

Índice de Tablas

1.1	Causas más frecuentes de subsidencias. Fuente: Tomás, 2009	1
2.1	Parámetros escogidos para la descarga de las imágenes radar en la web de la ESA	15
2.2	Codificación de las imágenes descargadas	16
3.1	Parámetros escogidos en las simulaciones realizadas en SARPROZ	30
3.2	Parámetros empleados en la eliminación de la pantalla de fase atmosférica en SARPROZ	32
3.3	Parámetros empleados en la metodología PSI en SARPROZ	33
4.1	Resultados del análisis DinSAR obtenidos en las diferentes litologías existentes	40
4.2	Desplazamientos del terreno en puntos cercanos al sondeo en la Ciudad de Granada	49
4.3	Desplazamientos del terreno en puntos cercanos al sondeo en la Ciudad de Lorca	50
4.4	Desplazamientos del terreno en puntos cercanos al sondeo en la Ciudad de Almería	50
4.5	Cuadro resumen de la correlación realizada	51

Bibliografía

- [AAG+10] H. Z. Abidin, H. Andreas, M. Gamal, I. Gumilar, M. Napitupulu, Y. Fukuda, T. Deguchi, Y. Maruyama, E. Riawan, *et al.*, «Land subsidence characteristics of the Jakarta Basin (Indonesia) and its relation with groundwater extraction and sea level rise,» *Groundwater response to changing climate, IAH selected papers on hydrogeology*, vol. 16, pp. 113–130, 2010.
- [Arr06] L. Arroyo Clavell, «Elaboració i anàlisi d'imatges radar des de satèl·lit: monitorització de deformacions de terreny,» 2006.
- [BHM+15] R. Bonì, G. Herrera, C. Meisina, D. Notti, M. Béjar-Pizarro, F. Zucca, P. J. González, M. Palano, R. Tomás, J. Fernández, *et al.*, «Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study,» *Engineering Geology*, vol. 198, pp. 40–52, 2015.
- [CR+] L. M. Cáceres Puro, J. Rodríguez Vidal, *et al.*, «Subsidencia de depósitos fluviales antiguos del río Tinto por procesos de disolución en rocas del sustrato (norte de Niebla),»
- [EHM+14] P. Ezquerro, G. Herrera, M. Marchamalo, R. Tomás, M. Béjar-Pizarro, and R. Martínez, «A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study,» *Journal of Hydrology*, vol. 519, pp. 1192–1204, 2014.
- [FJKK19] K. Fárová, J. Jelének, V. Kopačková-Strnadová, and P. Kycl, «Comparing DInSAR and PSI techniques employed to Sentinel-1 data to monitor highway stability: A case study of a massive dobkovičky landslide, Czech Republic,» *Remote Sensing*, vol. 11, no. 22, p. 2670, 2019.
- [FBD+18] M. Fomelis, J. M. D. Blasco, Y.-L. Desnos, M. Engdahl, D. Fernández, L. Veci, J. Lu, and C. Wong, «ESA SNAP-StAMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry,» in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2018, pp. 1364–1367.
- [GTS+14] D. Geudtner, R. Torres, P. Snoeij, M. Davidson, and B. Rommen, «Sentinel-1 system capabilities and applications,» in *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2014, pp. 1457–1460.
- [Har07] P. Hariharan, «White-Light Interference Microscopy,» *Basics of Interferometry, Academic Press*, pp. 105–110, 2007.
- [HTM+10] G. Herrera, R. Tomás, D. Monells, G. Centolanza, J. J. Mallorquí, F. Vicente, V. D. Navarro, J. M. Lopez-Sanchez, M. Sanabria, M. Cano, *et al.*, «Analysis of subsidence using TerraSAR-X data: Murcia case study,» *Engineering Geology*, vol. 116, no. 3-4, pp. 284–295, 2010.
- [HET+21] G. Herrera-García, P. Ezquerro, R. Tomás, M. Béjar-Pizarro, J. López-Vinielles, M. Rossi, R. M. Mateos, D. Carreón-Freyre, J. Lambert, P. Teatini, *et al.*, «Mapping the global threat of land subsidence,» *Science*, vol. 371, no. 6524, pp. 34–36, 2021.
- [LMP+02] Z. Lu, T. Masterlark, J. Power, D. Dzurisin, and C. Wicks, «Subsidence at Kiska volcano, western Aleutians, detected by satellite radar interferometry,» *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 18, pp. 2–1, 2002.
- [MEL+17] R. M. Mateos Ruiz, P. Ezquerro Martín, J. A. Luque Espinar, M. Béjar Pizarro, D. Notti, J. M. Azañón, O. Montserrat, G. Herrera García, F. Fernández Chacón, T. Peinado Parra, *et al.*, «El hundimiento de la Vega de Granada: un efecto de la sequía,» 2017.

- [MGP+19] P. Milillo, G. Giardina, D. Perissin, G. Milillo, A. Coletta, and C. Terranova, «Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi Bridge, Genoa, Italy,» *Remote Sensing*, vol. 11, no. 12, p. 1403, 2019.
- [NMM+16] D. Notti, R. M. Mateos, O. Monserrat, N. Devanthery, T. Peinado, F. J. Roldán, F. Fernández-Chacón, J. P. Galve, F. Lamas, and J. M. Azañón, «Lithological control of land subsidence induced by groundwater withdrawal in new urban areas (Granada Basin, SE Spain). Multiband DInSAR monitoring,» *Hydrological Processes*, vol. 30, no. 13, pp. 2317–2331, 2016.
- [Oli09] P. F. Oliveras, «Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DINSAR,» Ph.D. dissertation, Universidad de Granada, 2009.
- [PTBB17] R. Páez, C. Torrecillas, I. Barbero, and M. Berrocoso, «Regional positioning services as economic and construction activity indicators: the case study of Andalusian Positioning Network (Southern Spain),» *Geocarto international*, vol. 32, no. 1, pp. 44–58, 2017.
- [PPS+13] S. Paloscia, S. Pettinato, E. Santi, C. Notarnicola, L. Pasolli, and A. Reppucci, «Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 134, pp. 234–248, 2013.
- [Pat18] E. d. G. R. Patrício, «Avaliação da Tecnologia InSar para Monitorização de Grandes Obras,» 2018.
- [PNM+16] D. Peduto, G. Nicodemo, J. Maccabiani, S. Ferlisi, R. D'Angelo, and A. Marchese, «Investigating the behaviour of buildings with different foundation types on soft soils: two case studies in The Netherlands,» *Procedia Engineering*, vol. 158, pp. 529–534, 2016.
- [PF07] D. Perissin and A. Ferretti, «Urban-target recognition by means of repeated spaceborne SAR images,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 12, pp. 4043–4058, 2007.
- [PPED06] D. Perissin, C. Prati, M. E. Engdahl, and Y.-L. Desnos, «Validating the SAR wavenumber shift principle with the ERS–Envisat PS coherent combination,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 9, pp. 2343–2351, 2006.
- [PWW11] D. Perissin, Z. Wang, and T. Wang, «The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China,» *Proceedings of the ISRSE, Sidney, Australia*, vol. 1015, 2011.
- [Pon15] R. P. Poncela, «Hidrogeología del sistema acuífero volcánico de La Palma (Islas Canarias),» Ph.D. dissertation, Universitat d'Alacant-Universidad de Alicante, 2015.
- [PDS+12] A. Pulido-Bosch, J. Delgado, F. Sola, A. Vallejos, F. Vicente, J. M. López-Sánchez, and J. J. Mallorquí, «Identification of potential subsidence related to pumping in the Almería basin (SE Spain),» *Hydrological processes*, vol. 26, no. 5, pp. 731–740, 2012.
- [SGRG11] F. Sàbat, B. Gelabert, A. Rodríguez-Perea, and J. Giménez, «Geological structure and evolution of Majorca: Implications for the origin of the Western Mediterranean,» *Tectonophysics*, vol. 510, no. 1-2, pp. 217–238, 2011.
- [SAA10] P. B. Sánchez, G. B. Arciniegas, and D. O. Abaunza, «LA INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DInSAR–UNA TÉCNICA PARA EL MONITOREO DE LA SUBSIDENCIA EN BOGOTÁ DC (Conocimiento y Reflexión) DInSAR DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY-A TECHNIQUE FOR SUBSIDENCE MONITORING IN BOGOTÁ DC (Knowledge,» *Recuperado a partir de http://www.icc.es/index.php/cat/content/download/20083/64365/file/12_ARTICULO%20Boletín%20Colombiano%20de%20Geotecnia%20GBA.pdf*, 2010.
- [Sep+16] S. Seppi *et al.*, «Uso de interferometría diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, provincia de Bolzano, Italia,» *Universidad Nacional de Córdoba*, 2016.
- [SC94] M. Seymour and I. Cumming, «Maximum likelihood estimation for SAR interferometry,» in *Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, vol. 4, 1994, pp. 2272–2275.
- [SMRM10] E. Sillerico, M. Marchamalo, J. Rejas, and R. Martínez, «La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción,» *Informes de la Construcción*, vol. 62, no. 519, pp. 47–53, 2010.

- [SB13] J. Sousa and L. Bastos, «Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse,» *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, no. 3, pp. 659–667, 2013.
- [THL+10] R. Tomas, G. Herrera, J. Lopez-Sanchez, F. Vicente, A. Cuenca, and J. Mallorquí, «Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: Distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors,» *Engineering Geology*, vol. 115, no. 1-2, pp. 105–121, 2010.
- [THCM11] R. Tomás, G. Herrera, G. Cooksley, and J. Mulas, «Persistent Scatterer Interferometry subsidence data exploitation using spatial tools: The Vega Media of the Segura River Basin case study,» *Journal of Hydrology*, vol. 400, no. 3-4, pp. 411–428, 2011.
- [THD+10] R. Tomás, G. Herrera, J. Delgado, J. M. Lopez-Sanchez, J. Mallorquí, and J. Mulas, «A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain),» *Engineering geology*, vol. 111, no. 1-4, pp. 19–30, 2010.
- [THDP09] R. Tomás, G. Herrera, J. Delgado, and F. Peña, «Subsidencia del terreno,» *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 17, no. 3, pp. 295–302, 2009.
- [TML+05] R. Tomás, Y. Márquez, J. M. Lopez-Sanchez, J. Delgado, P. Blanco, J. J. Mallorquí, M. Martínez, G. Herrera, and J. Mulas, «Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 98, no. 2-3, pp. 269–283, 2005.
- [TRM+14] R. Tomás, R. Romero, J. Mulas, J. J. Marturià, J. J. Mallorquí, J. M. Lopez-Sanchez, G. Herrera, F. Gutiérrez, P. J. González, J. Fernández, *et al.*, «Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain,» *Environmental earth sciences*, vol. 71, no. 1, pp. 163–181, 2014.
- [YPG+16] N. Yagüe-Martínez, P. Prats-Iraola, F. R. Gonzalez, R. Brcic, R. Shau, D. Geudtner, M. Eineder, and R. Bamler, «Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 4, pp. 2220–2234, 2016.
- [YGC+18] A. Yhokha, P. K. Goswami, C.-P. Chang, J.-Y. Yen, K.-E. Ching, and K. M. Aruche, «Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) in monitoring slope movements in Nainital, Uttarakhand Lesser Himalaya, India,» *Journal of Earth System Science*, vol. 127, no. 1, pp. 1–13, 2018.

Resumen

La tecnología DinSAR cuenta con numerosas aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería. En este Trabajo Fin de Máster se llevará a cabo un estudio de los desplazamientos verticales de la superficie del terreno y su posible vinculación con la edificación existente, la geología y el nivel freático en tres zonas críticas en materia de subsidencias en nuestro país: la ciudad de Granada, la comarca de Lorca en Murcia, y el tramo final del río Andarax, en la ciudad de Almería.

Empleando imágenes radar procedentes del satélite SENTINEL-1 en el intervalo temporal comprendido entre 2018 y 2021, las cuales mediante interferometría SAR diferencial y gracias a los datos de acceso libre disponibles en materia de hidrología, geología, meteorología e información catastral, intentarán encontrar una correlación entre las subsidencias encontradas y las características de la zona en la que se encuentran. Los datos radar forman parte de la constelación Copernicus, el programa de observación de la Tierra más ambicioso que se ha llevado a cabo hasta la actualidad, y respaldado por la Agencia Espacial Europea (ESA) desde el año 2001. Para la realización de dicho análisis se ha empleado el software SARPROZ, desarrollado por el Grupo de investigación de Procesamiento de Señales del Politécnico de Milán (Italia).

Los resultados de este software, contrastados con los valores geológicos, catastrales y freáticos, manifiestan las siguientes conclusiones:

- Las subsidencias acaecidas muestran que la geología tiene una alta incidencia en este parámetro, destacando los terrenos aluviales y los suelos granulares como los que mayor amplitud genera.
- La tendencia de deformación vertical del suelo es acorde con la tendencia de subida y bajada del nivel piezométrico a lo largo del período estudiado.
- El orden de magnitud de los valores medidos son concordantes con los estudios previos realizados por diversos autores, los cuales sirvieron de cimentación para el desarrollo de este trabajo.

Abstract

DinSAR technology has many practical applications in the field of engineering. In this Master's Thesis, a study of the vertical displacements of the ground surface and their possible link with the existing building, the geology and the water table will be carried out in three critical areas of subsidence in our country: the city of Granada, the region of Lorca in Murcia, and the final stretch of the river Andarax, in the city of Almeria.

Using radar images from the SENTINEL-1 satellite in the time interval between 2018 and 2021, which by means of differential SAR interferometry and thanks to the freely available data on hydrology, geology, meteorology and cadastral information, will attempt to find a correlation between the subsidence found and the characteristics of the area in which they are located. The radar data are part of the Copernicus constellation, the most ambitious Earth observation programme to date, which has been supported by the European Space Agency (ESA) since 2001. The SARPROZ software, developed by the Signal Processing Research Group of the Politecnico di Milano (Italy), has been used to carry out this analysis.

The results of this software, contrasted with the geological, cadastral and phreatic values, show the following conclusions:

- The subsidence that has occurred shows that geology has a high incidence on this parameter, with alluvial terrains and granular soils standing out as those that generate the greatest amplitude.
- The vertical deformation trend of the soil is in accordance with the upward and downward trend of the piezometric level throughout the period studied.
- The order of magnitude of the measured values are in agreement with previous studies carried out by various authors, which served as a foundation for the development of this work.

1 Introducción

1.1 Subsidiencias urbanas

1.1.1 Concepto de subsidencia y sus causas

La Real Academia Española de la Lengua define la subsidencia como *'el hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia de trabajos de minería, colapso de cavidades subterráneas, extracción de agua o de petróleo, o desecación'*.

Estas, también puede ser causada por fenómenos naturales como terremotos, compactación del suelo, erosión y adición de agua a los suelos finos. El hundimiento puede producirse tanto a gran escala (miles de hectáreas) como a pequeña escala (metros cuadrados).

Las causas pueden ser clasificadas atendiendo a la siguiente tabla, extraída del artículo publicado en 2009 por el Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Dr. Roberto Tomás Jover *'Subsidencia del Terreno'* (Tomás, 2009).

Tabla 1.1 Causas más frecuentes de subsidencias. Fuente: Tomás, 2009.

Subsidencia		Causa	Figura
Por disolución subterránea	En Sal	El cloruro sódico, el yeso y las rocas carbonáticas se disuelven por el agua y aparecen huecos en el terreno. Estos se pueden terminar comunicando y el terreno deformándose o colapsar.	1.1-a
	En Yeso		
	En rocas carbonáticas		
Por construcción de obras subterráneas		El terreno se deforma al intentar ocupar el vacío disponible tras la construcción de un túnel o galería.	1.1-b
Por erosión subterránea		El agua fluye lateralmente por el suelo, formando tubos de erosión en el terreno que puede provocar deformación e incluso colapso.	1.1-c
Por flujo lateral	Rocas salinas	Al yacer sobre materiales salinos (tendencia ascendente) o arcillosos sufren fenómenos diapíricos que crean deformaciones en roca.	1.1-d
	Arcillas		1.1-e
Por compactación	Carga	Debido a una reducción de huecos en el suelo por la consolidación del suelo. Puede estar causado por el peso de sedimentos o edificaciones (por carga), por terremotos o explosiones (por vibración), por extracción de agua, petróleo o gas (fluidos), o por la saturación de suelos secos (hidrocompactación).	1.2-a
	Drenaje		1.2-b
	Vibración		1.2-c
	Extracción de fluidos		1.2-d
Hidrocompactación			
Tectónica		Debida al deslizamiento en una falla.	1.1-f

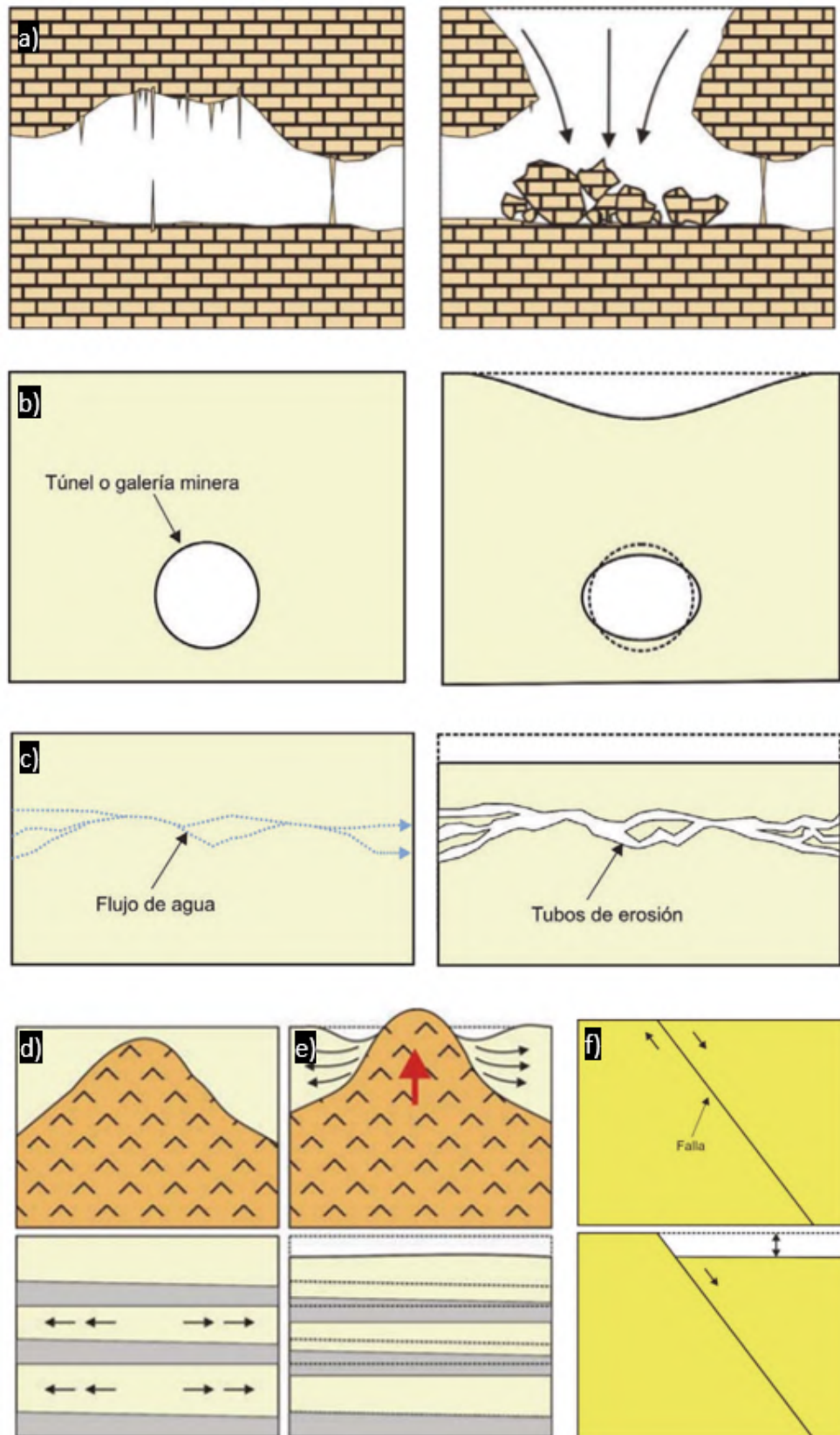


Figura 1.1 Subsencias causadas por a) disolución subterránea, b) construcción de obras subterráneas, c) erosión subterránea, d) por flujo lateral de rocas salinas o de e) arcillas, y por f) tectónica (Tomás, 2009).

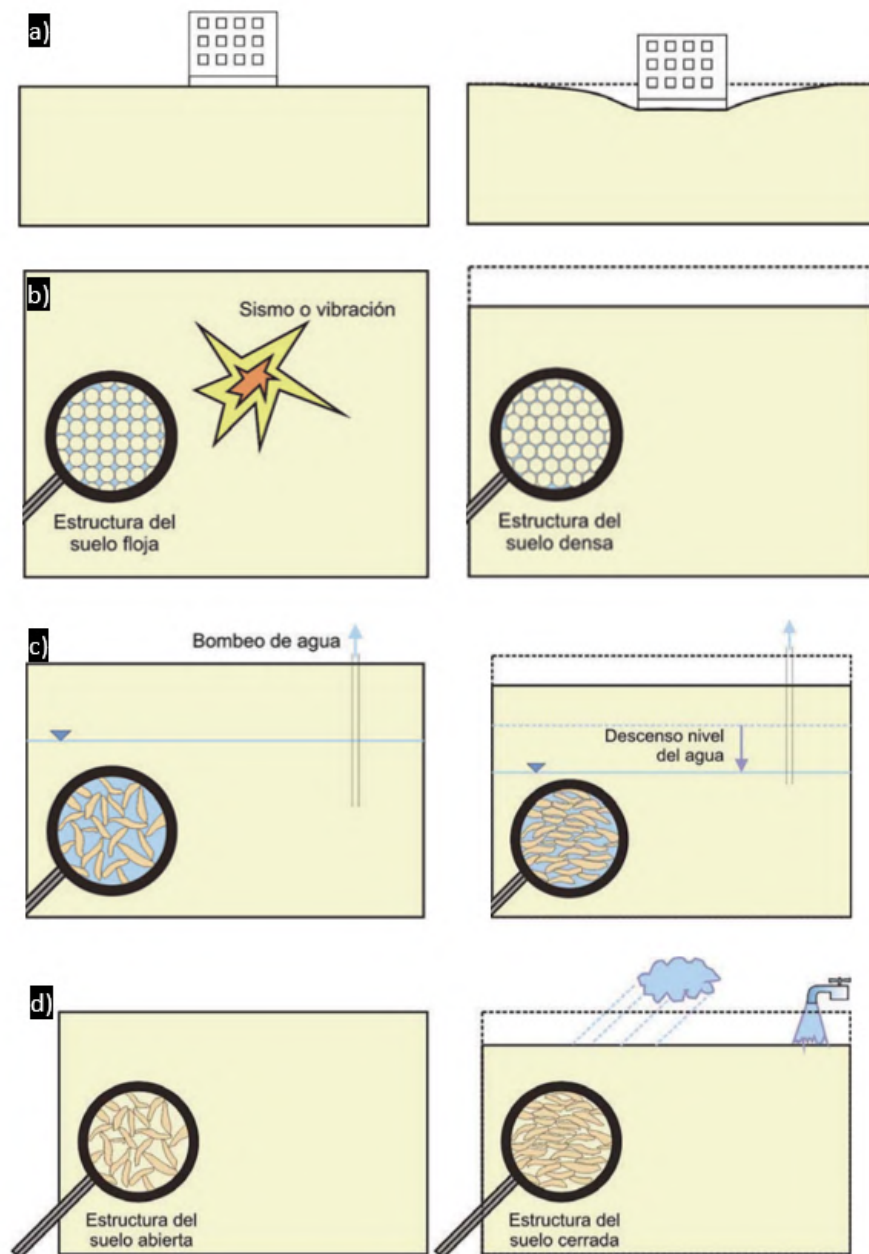


Figura 1.2 Subsidiencias causadas por compactación debidas a a) cargas, b) vibración, c) extracción de fluidos o d) hidrocompactación (Tomás, 2009).

Una forma de medir estos cambios es a través de los Global Navigation Satellite System (GNSS), sistemas globales de navegación por satélite. A nivel nacional, contamos con la Red GNSS, servicio de posicionamiento diferencial en tiempo real generado a partir de estaciones permanentes, así como otras titularidad de las Comunidades Autónomas. En el caso de Andalucía, la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP), establecida en 2004, cuenta con 22 estaciones multiconstelación que la Junta de Andalucía ofrece para obtener un servicio de alta precisión (Paez et al., 2017).

Las zonas que no cuentan con una red de este calibre pueden medir el hundimiento a partir del InSAR (Radar de Apertura Sintética Interferométrica) por satélite, receptores GPS temporales, estudios repetidos de nivelación geodésica o instalaciones de sensores de suelo y agua.

1.1.2 Marco actual del riesgo de subsidencias

Según los últimos estudios publicados en un artículo para la revista Science en su edición de enero de 2021 (Autores: Herrera-García, Ezquerro, Tomás, Béjar-Pizarro), aproximadamente el diecinueve por ciento de la población mundial podría sufrir los efectos de la subsidencia del terreno. Este efecto puede ser potencialmente destructivo, independientemente de la velocidad con la que se produzca el hundimiento. Además de causar problemas en cimentaciones de edificaciones, también afecta a las reservas de agua de abastecimiento existentes en acuíferos. También puede modificar la compacidad del terreno, reduciendo su permeabilidad y, por tanto, aumentando el riesgo de inundación y riada.

Es por esto que se realizó un análisis probabilístico a nivel mundial donde se delimitó la peligrosidad asociada a este efecto. Se observa en la Figura 1.3 que en Asia se concentra la mayor parte de territorio en riesgo de subsidencia, con un 86 % del mundial en este continente.

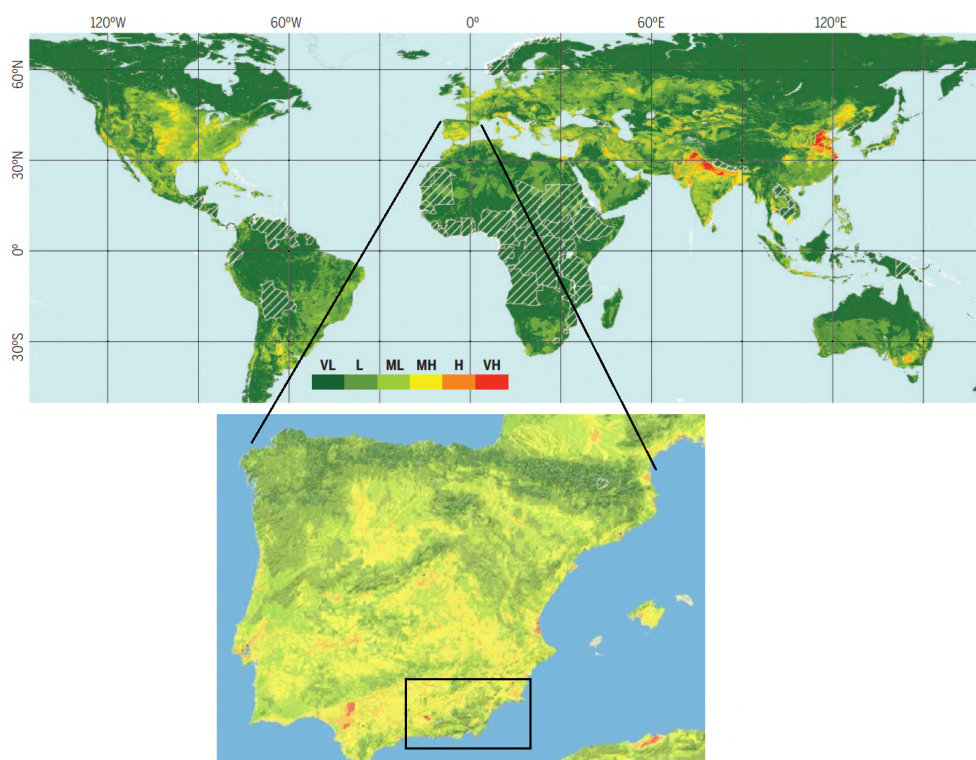


Figura 1.3 En la imagen superior se aprecia un mapa mundial donde el color indica los intervalos de probabilidad de muy bajo (verde oscuro) a muy alto (rojo intenso). En la imagen inferior, se representa la Península Ibérica en detalle. Fuente: *Mapping the global threat of land subsidence, Science Magazine* (2021).

1.2 La teledetección en la detección de subsidencias

1.2.1 La Agencia Espacial Europea

La Agencia Espacial Europea (en inglés y oficialmente, *European Space Agency*, ESA) es una organización internacional dedicada a la exploración espacial. En palabras de la propia organización, se ha concebido como 'la puerta de Europa al espacio', al contar con misiones aunque tan diversas, todas orientadas al desarrollo de la capacidad espacial del continente y a garantizar que la inversión en el espacio siga aportando beneficios a los ciudadanos de Europa y del mundo.



Figura 1.4 Logotipo oficial de la Agencia Espacial Europea. Fuente: ESA, 2021.

El objetivo principal de dicha organización, según el Artículo II del Convenio de creación de la ESA, es el de prever y promover, con fines exclusivamente pacíficos, la cooperación entre los Estados europeos en materia de investigación y tecnología espaciales y sus aplicaciones espaciales, con vistas a su utilización para fines científicos y para sistemas de aplicaciones espaciales operativas mediante:

- La elaboración y aplicación de una política espacial europea a largo plazo, recomendando a los Estados miembros objetivos espaciales y concertando las políticas de los Estados miembros con respecto a otras organizaciones e instituciones nacionales e internacionales.
- La elaboración y aplicación de actividades y programas en el ámbito espacial.
- La coordinación del programa espacial europeo y los programas nacionales, e integrando estos últimos de forma progresiva y lo más completa posible en el programa espacial europeo.
- La elaboración y aplicación de la política industrial adecuada a su programa y la recomendación a los Estados miembros de una política industrial coherente.

Las actividades de la ESA se dividen en dos categorías: "obligatorias" y "opcionales". Los programas realizados con cargo al presupuesto general y al presupuesto del programa de ciencias espaciales son "obligatorios"; incluyen las actividades básicas de la agencia (estudios sobre futuros proyectos, investigación tecnológica, inversiones técnicas compartidas, sistemas de información y programas de formación).

Todos los Estados miembros contribuyen a estos programas de manera proporcional a su Producto Nacional Bruto (PNB). Los demás programas, conocidos como "opcionales", son financiados por los Estados miembros que se encuentren interesados, siendo de su elección el nivel de participación económica al que se someterán.

Los programas opcionales abarcan ámbitos como la observación de la Tierra, las telecomunicaciones, la navegación por satélite y el transporte espacial. Asimismo, la Estación Espacial Internacional y la investigación en microgravedad se financian con contribuciones opcionales.

1.2.2 Programa *Copernicus*

El Programa *Copernicus* de monitorización terrestre se encuentra coordinado por la Comisión Europea en colaboración con la ESA, los Estados miembros de la UE y las agencias de la UE. Su objetivo principal es el de generar información exacta, fiable, continua y libre en materia de observación terrestre de alta calidad, para así poder analizar el estado del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático, y asegurar la seguridad civil.

El objetivo de *Copernicus* es vigilar y pronosticar el estado del medio ambiente en la tierra, el mar y la atmósfera, con el fin de apoyar las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, la gestión eficaz de las situaciones de emergencia y la mejora de la seguridad de todos los ciudadanos. La información proporcionada por *Copernicus* mejora la seguridad de las personas, por ejemplo, proporcionando información sobre catástrofes naturales como incendios forestales o inundaciones, y contribuyendo así a evitar la pérdida de vidas y bienes, y los daños al medio ambiente.



Figura 1.5 Logotipo oficial del Programa *Copernicus*. Fuente: ESA, 2021.

Los servicios de información de *Copernicus* se basan en los datos de una constelación de 6 familias de satélites conocida como *Sentinel*, y decenas de satélites de terceros conocidos como misiones espaciales contribuyentes. Estos aparatos de medición en órbita funcionan en ocasiones de manera independiente, aunque también pueden hacerlo de manera combinada con otros sensores.

Copernicus almacena luego los datos y contribuye a proporcionar una gran cantidad de información fiable y actualizada sobre el estado de nuestro planeta. Estos datos pueden utilizarse para crear diferentes tipos de productos, como estadísticas y mapas topográficos. Los datos se analizan de forma que generan indicadores útiles para los investigadores y usuarios finales, proporcionando información sobre las tendencias pasadas, presentes y futuras.

Estas actividades de valor añadido se racionalizan a través de seis flujos temáticos de servicios *Copernicus*:



Figura 1.6 Seis áreas de estudio del Programa *Copernicus*. Fuente: ESA, 2021.

Copernicus no sólo contribuye a la excelencia científica y técnica europea, sino que se inscribe en un marco de servicio público que permite el acceso pleno, gratuito y abierto a todos los datos recogidos.

1.2.3 Misiones *Sentinel*

Las misiones *Sentinel* fueron desarrolladas por la ESA dentro del Programa *Copernicus*, con la finalidad de reemplazar las misiones de observación de la Tierra más antiguas que se han retirado, como las misiones ERS y Envisat, o que actualmente se acercan al final de su vida útil.

La ESA desarrolla actualmente siete misiones en el marco del programa *Sentinel* (*Sentinel* 1, 2, 3, 4, 5P, 5, 6). Las misiones *Sentinel* incluyen imágenes radar y superespectrales para la vigilancia terrestre, oceánica y atmosférica. Cada misión *Sentinel* se basa en una constelación de dos satélites para cumplir y revisar los requisitos de cobertura de cada misión, proporcionando conjuntos de datos sólidos para todos los servicios de *Copernicus*. El contenido de cada una de ellas se detalla a continuación:

- ***Sentinel* 1:** Con los objetivos de vigilancia terrestre y oceánica, *Sentinel*-1 está compuesto por dos satélites de órbita polar que operaran de día y de noche, y realizan imágenes de radar, lo que les permite adquirir imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas. El primer satélite *Sentinel*-1 fue lanzado en abril de 2014.
- ***Sentinel* 2:** El objetivo de *Sentinel*-2 es la vigilancia terrestre, y la misión está compuesta por dos satélites de órbita polar que proporcionan imágenes ópticas de alta resolución. La vegetación, el suelo y las zonas costeras son algunos de los objetivos de vigilancia. El primer satélite *Sentinel*-2 se lanzó en junio de 2015.
- ***Sentinel* 3:** El objetivo principal de *Sentinel*-3 es la observación marina, y estudiará la topografía de la superficie del mar, la temperatura de la superficie del mar y de la tierra, y el color del océano y de la tierra. Compuesto por tres satélites, el instrumento principal de la misión es un altímetro de radar, pero los satélites de órbita polar llevarán múltiples instrumentos, incluidas imágenes ópticas.
- ***Sentinel* 4:** dedicado a la vigilancia de la calidad del aire. El instrumento *Sentinel*-4 UVN (multiespectrales: banda visible, banda cercana al ultravioleta y banda de infrarrojos) es un espectrómetro transportado a bordo de los satélites *Meteosat* de tercera generación, operados por EUMETSAT (Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos). El objetivo de la misión es proporcionar una vigilancia continua de la composición de la atmósfera terrestre con una alta resolución temporal y espacial, y los datos se utilizarán para apoyar la vigilancia y las previsiones sobre Europa.
- ***Sentinel* 5:** se dedica a la vigilancia de la calidad del aire. El instrumento *Sentinel*-5 UVNS es un espectrómetro transportado a bordo de los satélites *MetOp* (Satélite operativo meteorológico) de segunda generación. La misión tiene como objetivo proporcionar una vigilancia continua de la composición de la atmósfera terrestre. Proporciona datos de gran alcance y cobertura global para vigilar la calidad del aire en todo el mundo.
- ***Sentinel* 5P:** una misión satelital precursora, pretende llenar el vacío de datos y proporcionar una continuidad de datos entre la retirada del satélite *Envisat* y la misión *Aura* de la NASA y el lanzamiento de *Sentinel*-5. El objetivo principal de la misión *Sentinel*-5P es realizar mediciones atmosféricas, con alta resolución espacio-temporal, relacionadas con la calidad del aire, el forzamiento climático, el ozono y la radiación UV. El satélite fue lanzado con éxito el 13 de octubre de 2017 desde el cosmódromo de Plesetsk (Rusia). En la actualidad, se han utilizado datos provenientes de este satélite para estudios ambientales, como las emisiones de metano procedentes de vertederos de residuos sólidos urbanos.
- ***Sentinel* 6:** Ante el aumento del nivel medio del mar en todo el mundo debido al cambio climático, *Copernicus Sentinel*-6 es la próxima misión de referencia de altimetría por radar que ampliará el legado de mediciones de la altura de la superficie del mar hasta al menos 2030. El satélite lleva un altímetro radar *Poseidón*-4 y un radiómetro de microondas.



Figura 1.7 Satélites *Sentinel* en funcionamiento en la actualidad. Fuente: www.elpais.com, 2017.

1.2.4 Obtención de productos *Sentinel-1*

Como ya se enfatizó con anterioridad, la misión Sentinel-1 está conformada por una constelación de dos satélites de órbita polar, que adquiere imágenes de radar de apertura sintética en banda C. Gracias a que los datos RADAR no se ven afectados por las condiciones atmosféricas o por el hecho de ser de día o de noche, la monitorización de la superficie terrestre es constante. El lanzamiento del Sentinel-1A se realizó el 3 de abril del 2014 y su gemelo el Sentinel-1B el 25 de abril del 2016, al día de hoy ambos satélites se encuentran operativos con un ciclo de revisita de 6 días. Algunas características aparecen representadas en la siguiente Figura 1.12:

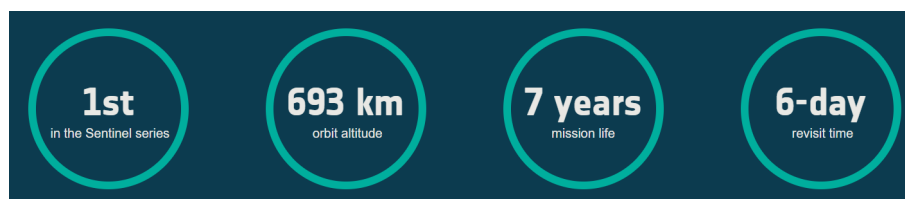


Figura 1.8 Algunos datos de interés correspondientes con el satélite *Sentinel 1*. Fuente: ESA, 2021.

Las escenas de Sentinel -1 se capturan en cuatro modos de imagen exclusivos con diferente resolución y cobertura:

- 1. Franja de mapa (SM):** Proporciona datos con una resolución espacial de 5x5m y una escena de vista del sensor sobre la superficie terrestre de 80km.
- 2. Amplia banda interferométrica (IW):** Este modo combina un ancho de escena de 250km con una resolución moderada de 5x20m.
- 3. Franja externa ancha (EW):** Este modo se emplea sobre zonas marítimas y polares, donde se necesita una gran cobertura y tiempos de revisita cortos. El ancho de escena en este modo es de 400km con una resolución de 20x40m.
- 4. Modo de ondas (WV):** Este modo pretende ayudar en la determinación de la dirección y altura de olas en el océano. Se compone de imágenes con una resolución de 20x20km que se adquieren alternativamente con dos ángulos de incidencia cada 100km, es decir, dos imágenes con el mismo ángulo de incidencia están separadas 200km.

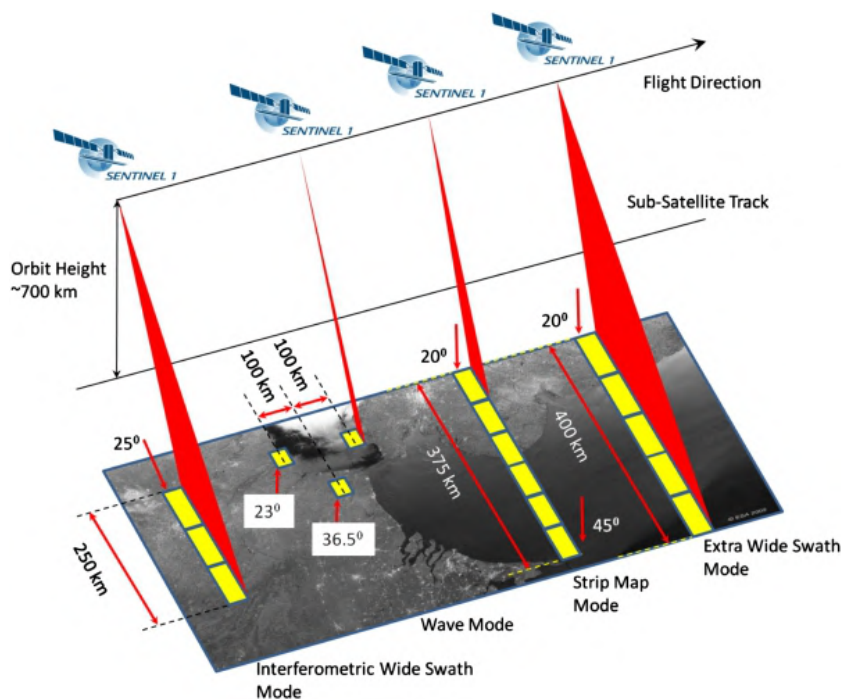


Figura 1.9 Toma de datos del satélite *Sentinel 1*. Fuente: ESA, 2021.

Estos modos descritos cuentan con varias opciones de polarización, la cual indica la dirección de la onda dentro de la banda electromagnética asignada. Se habla de polarización doblemente horizontal (HH), donde envía y recibe ondas horizontalmente, doblemente vertical (VV), donde solo envía y recibe ondas verticalmente, mientras que una antena con polarización VH sólo emitiría ondas verticalmente y solo recibiría ondas horizontalmente.

Los productos en Modo de Ondas (WV) sólo estarán disponibles para polarización simple (HH o VV), mientras que los demás modos (SM, IW, EW) estarán disponibles tanto para polarización simple (HH o VV) como dual (VV+VH o HH+HV).

Los productos adquiridos por Sentinel -1 se dividen también según el tipo de proceso:

- Complejo de una sola mirada (SLC): Tiene un nivel de procesamiento 1, georreferenciado utilizando datos de la órbita y la altitud del satélite.
- Rango de tierra observada (GRD): productos SAR tienen un nivel de procesamiento 1 que han sido proyectados usando un modelo elipsoidal de la Tierra. Estos productos podemos encontrarlos además con 3 resoluciones:
 - Full Resolution (FR).
 - High Resolution (HR).
 - Medium Resolution (MR).
- Océano (OCN): por otro lado, los productos oceánicos tienen un nivel de procesamiento 2 con información sobre la velocidad y la dirección del viento.

1.2.5 Metodología DinSAR y su uso en subsidencias

Las imágenes SAR expresan la distribución espacial de la amplitud (reflectividad) y la fase de los ecos radar registrados por el sistema correspondiente a los blancos presentes en la escena. La combinación de dos imágenes SAR de la misma escena, tomadas en instantes diferentes, da como resultado una nueva imagen conocida como interferograma. El interferograma representa la variación de la fase entre las dos imágenes y la fiabilidad en su estimación depende de la coherencia, parámetro que sirve para caracterizar y medir todas

las fuentes de decorrelación.

El principal objetivo de esta técnica consiste en minimizar, en la medida de lo posible, todos los términos intervinientes en la fase interferométrica excepto aquel que hace referencia a las deformaciones del terreno. De esta manera, se podrá realizar un estudio de las subsidencias acontecidas en el área de estudio.

1.3 Emplazamientos estudiados

A nivel nacional, numerosos científicos han publicado artículos sobre las subsidencias que han sido observadas en nuestro país. Algunos ejemplos pueden ser las ciudades de Cambrils y Girona (Tomás y Romero, 2013), Madrid (Ezquerro, 2014) o Mallorca (Sabat, 2011), entre otros. A través de publicaciones similares se han podido identificar tres localizaciones sensibles a este hecho para llevar a cabo su estudio en el presente trabajo, las cuales se encuentran señaladas en el mapa correspondiente con la Figura 1.10:



Figura 1.10 En rojo, las provincias españolas que se analizarán en el presente Trabajo Fin de Máster.

1.3.1 Granada

La ciudad de Granada, capital de la provincia homónima, lleva sufriendo una enorme expansión urbana a lo largo de las últimas décadas. Esto ha provocado un aumento sustancial de necesidades de abastecimiento de agua, las cuales se han paliado mediante el bombeo de aguas subterráneas desde un acuífero detrítico confinado de depósitos de abanico aluvial con distribución de facies heterogénea (Fuente: *Lithological control of land subsidence induced by groundwater withdrawal in new urban AREAS (Granada Basin, SE Spain). Multiband DInSAR monitoring. Autores: Davide Notti, Rosa María Mateos*).

Debido a que se midieron tasas de subsidencia del orden de 10 a 15 milímetros al año en el período comprendido entre 2003 y 2009, se continuará dicho estudio en un intervalo temporal más actual. Se adjunta en la Figura 1.11 una ortofotografía aérea junto con información geográfica relevante del municipio de Granada:

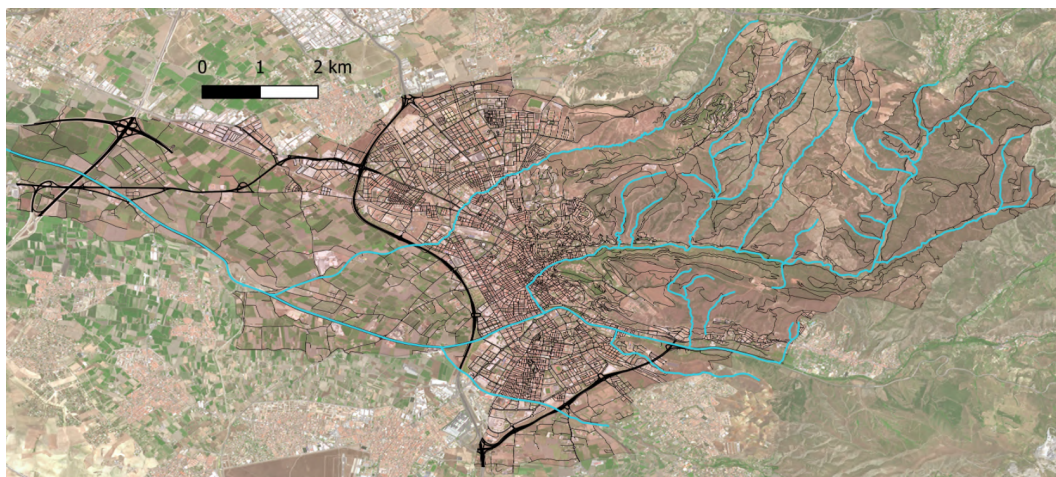


Figura 1.11 Municipio de Granada (provincia de Granada) en rosa, donde aparecen representados los principales cursos fluviales en azul y la red de carreteras y viario urbano existente en la ciudad en negro.

1.3.2 Lorca

La cuenca del Alto Guadalentín ha sufrido una severa subsidencia del terreno desde hace varias décadas. El hundimiento del suelo detectado podría ser consecuencia de un descenso del nivel de las aguas subterráneas debido a la sobreexplotación de los acuíferos de dicha cuenca (Fuente: *Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain)*. Autores: Roberta Boni, Gerardo Herrera).

Es por esto que se analizará el comportamiento del terreno con el paso del tiempo para cuantificar el hundimiento que sufre la superficie en los últimos años. La zona estudiada, correspondiente con el municipio de Lorca, aparece representada en la Figura 1.12.

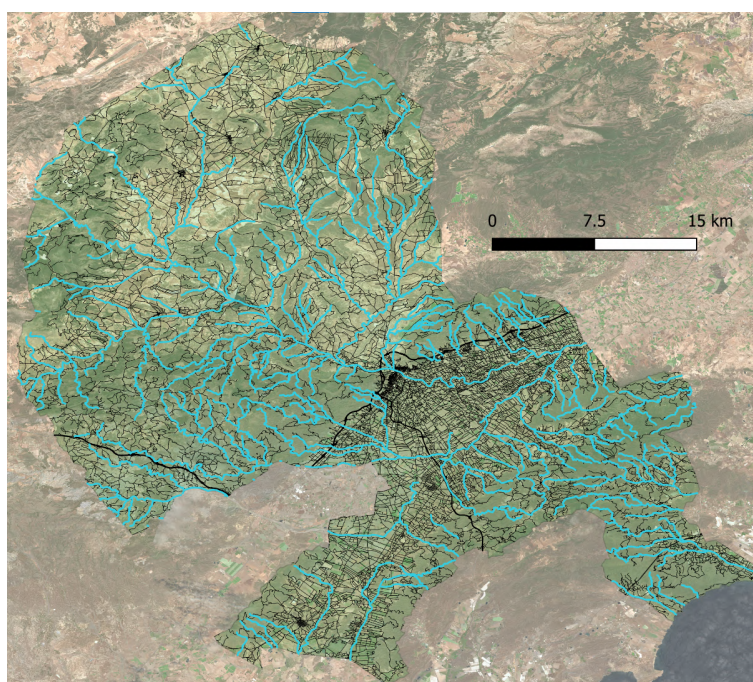


Figura 1.12 Municipio de Lorca (Región de Murcia) en verde, donde aparecen representados los principales cursos fluviales en azul y la red de carreteras y viario urbano existente en la ciudad, en negro.

1.3.3 Almería

La tercera localización estudiada se trata del municipio capital de la Provincia de Almería. En esta zona, se ha estudiado el hundimiento del suelo de los depósitos detríticos mediante técnicas DinSAR, debido a su situación tan particular en cuanto a las bajas precipitaciones que recibe esta área, una de las más bajas de Europa. En los últimos sesenta años, la enorme expansión agrícola y urbana ha acontecido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas, motivo por el cual Pulido-Bosch en 2012 escribió sobre ello en el artículo *Identification of potential subsidence related to pumping in the Almeria basin (SE Spain)*. El municipio de Almería aparece representado en la Figura 1.13.

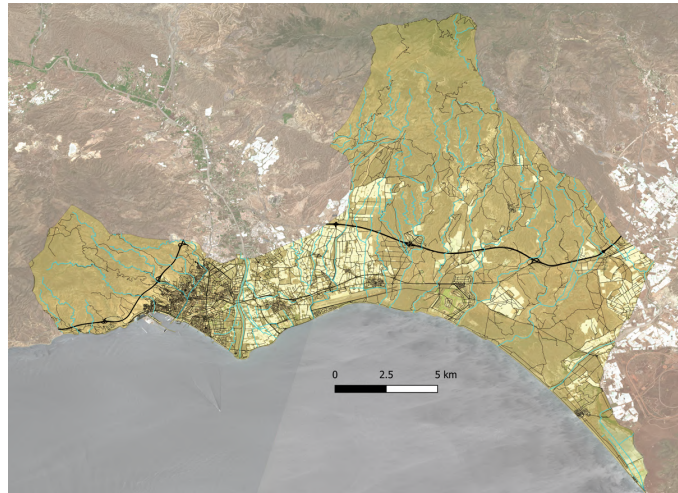


Figura 1.13 Municipio de Almería en amarillo, donde aparecen representados los principales cursos fluviales en azul y la red de carreteras y viario urbano existente en la ciudad, en negro.

1.4 Objetivos

Los objetivos del presente Trabajo Fin de Máster son los siguientes:

1. El estudio de la técnica de interferometría diferencial con radar de apertura sintética (DinSAR) y su aplicación en el cálculo de subsidencias del terreno a partir de imágenes radar, para las áreas urbanas de Granada, Lorca y Almería entre los años 2018 y 2021.
2. Intentar encontrar una correlación entre las subsidencias medidas en estas zonas con características de las edificaciones que allí se encuentran como pueden ser su antigüedad o su altura, la geología del terreno sobre el que se asientan, así como el nivel freático a lo largo del período elegido.
3. Continuar con los estudios desarrollados por los autores ya mencionados, los cuales sirvieron de precedente para este trabajo. Se trata de:
 - *Lithological control of land subsidence induced by groundwater withdrawal in new urban AREAS (Granada Basin, SE Spain). Multiband DInSAR monitoring* - Davide Notti, Rosa María Mateos.
 - *Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study* - Roberta Bonì, Gerardo Herrera
 - *Identification of potential subsidence related to pumping in the Almería basin (SE Spain)* - Antonio Pulido-Bosch, Jose Delgado
4. Manifestar la gran importancia del empleo de datos abiertos para el desarrollo de este estudio, así como de las plataformas oficiales de descarga utilizadas. Gracias a las políticas existentes en nuestro país, las cuales facilitan los estudios por la sencillez en la descarga de imágenes satelitales e información catastral, geológica y freática, se ha podido completar este análisis. Además, debido a la condición de estudiante, se ha otorgado licencia gratuita para el software SARPROZ para la realización de este estudio.

multirow

2 Datos de partida

En este apartado se desarrollará todo el proceso de obtención de datos necesarios para el estudio que concierne a este Trabajo Fin de Máster, los cuales se encuentran resumidos en la siguiente lista:

1. Imágenes Sentinel 1, necesarias para el cálculo interferométrico.
2. Datos catastrales para el análisis de las construcciones existentes.
3. La geología del terreno para su posible implicación en las subsidencias.
4. La meteorología, y en concreto las precipitaciones, para el estudio de su influencia en los recursos subterráneos.
5. El nivel freático, el cual afectará a la compactabilidad del terreno.

2.1 Imágenes Sentinel 1

Como ya se ha comentado anteriormente, se emplearán imágenes fruto de los satélites Sentinel-1 en el período temporal comprendido entre el 2018 y el 2021 en los tres emplazamientos estudiados.

Gracias a la web oficial de la Agencia Espacial Europea, la cual cuenta con descarga directa, libre y gratuita de las imágenes Sentinel-1 a través de su buscador, se han podido definir las características temporales, espaciales y de las imágenes deseadas. En la tabla siguiente se recogen los parámetros empleados en el buscador de la web de la Agencia Espacial Europea, con el objetivo de obtener las imágenes deseadas.

Tabla 2.1 Parámetros escogidos para la descarga de las imágenes radar en la web de la ESA.

Parámetros		Comentario
Mission	Sentinel-1	Misión escogida
Satellite Platform	S1 A	Satélite Sentinel 1-A
Product Type	SLC	Single Look Complex
Polarisation	VV	Polarización vertical
Sensor Mode	IW	Cobertura interferométrica

Siguiendo estos criterios, se han descargado las siguientes imágenes, enumeradas en la tabla con su codificación original:

Tabla 2.2 Codificación de las imágenes descargadas.

GRANADA	
Descendentes	S1A_IW_SLC_1SDV_20180523T061845_20180523T061912_022028_026157_8426
	S1A_IW_SLC_1SDV_20190518T061851_20190518T061918_027278_031369_BF4E
	S1A_IW_SLC_1SDV_20200524T061857_20200524T061924_032703_03C9B6_4AED
	S1A_IW_SLC_1SDV_20210519T061903_20210519T061930_037953_047AB8_B585
Ascendentes	S1A_IW_SLC_1SDV_20180529T181013_20180529T181040_022123_026457_B49B
	S1A_IW_SLC_1SDV_20190512T181018_20190512T181045_027198_0310ED_AC37
	S1A_IW_SLC_1SDV_20200506T181024_20200506T181051_032448_03C1F6_3A40
	S1A_IW_SLC_1SDV_20210525T181031_20210525T181058_038048_047D92_D52F
LORCA	
Descendentes	S1A_IW_SLC_1SDV_20180518T061033_20180518T061100_021955_025EF3_2E5B
	S1A_IW_SLC_1SDV_20190501T061038_20190501T061105_027030_030B3F_5E0D
	S1A_IW_SLC_1SDV_20200531T061046_20200531T061113_032805_03CCC1_37EE
	S1A_IW_SLC_1SDV_20210526T061052_20210526T061119_038055_047DC6_1CC0
Ascendentes	S1A_IW_SLC_1SDV_20180529T181013_20180529T181040_022123_026457_B49B
	S1A_IW_SLC_1SDV_20190512T181018_20190512T181045_027198_0310ED_AC37
	S1A_IW_SLC_1SDV_20200506T181024_20200506T181051_032448_03C1F6_3A40
	S1A_IW_SLC_1SDV_20210525T181031_20210525T181058_038048_047D92_D52F
ALMERÍA	
Descendentes	S1A_IW_SLC_1SDV_20180518T061033_20180518T061100_021955_025EF3_2E5B
	S1A_IW_SLC_1SDV_20190501T061038_20190501T061105_027030_030B3F_5E0D
	S1A_IW_SLC_1SDV_20200531T061046_20200531T061113_032805_03CCC1_37EE
	S1A_IW_SLC_1SDV_20210526T061052_20210526T061119_038055_047DC6_1CC0
Ascendentes	S1A_IW_SLC_1SDV_20180529T180948_20180529T181015_022123_026457_7BB9
	S1A_IW_SLC_1SDV_20190512T180953_20190512T181020_027198_0310ED_1E94
	S1A_IW_SLC_1SDV_20200506T181000_20200506T181026_032448_03C1F6_724F
	S1A_IW_SLC_1SDV_20210513T181006_20210513T181033_037873_047848_22DD

Se adjunta en la Figura 2.1 el entorno de búsqueda de la web nombrada para el caso de la obtención de las imágenes más recientes (2021) de la ciudad de Granada:

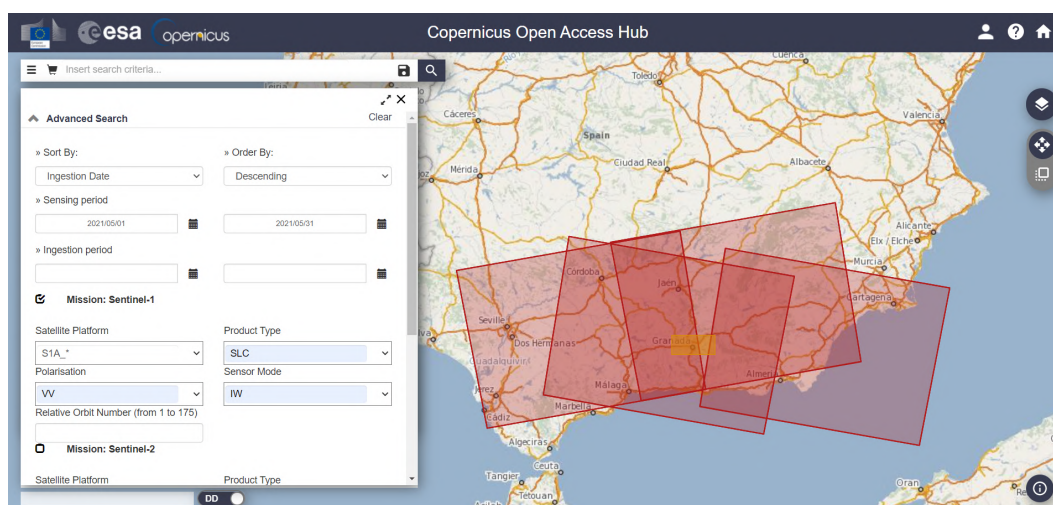


Figura 2.1 Ejemplo de actuación del motor de búsqueda de imágenes satelitales en la web de la ESA.

2.2 Catastro

La información catastral se encuentra disponible en la web del Ministerio de Hacienda. Para su descarga, se ha empleado un complemento externo del software QGIS: "Descarga Catastro Inspire". En la Figura 2.2 aparece una captura del motor de búsqueda mencionado:

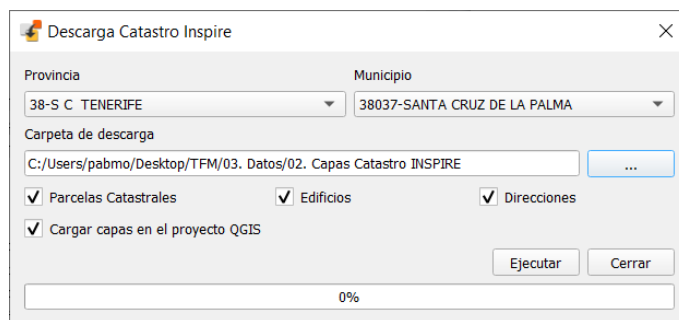


Figura 2.2 Ventana de descarga del motor de búsqueda de la información catastral INSPIRE.

Estos datos cuentan con una gran cantidad de información, la cual tras ser procesada para su empleo de una forma más sencilla indica:

- Referencia Catastral.
- Número de pisos de la edificación sobre el suelo.
- Altura de la edificación sobre el suelo.
- Número de pisos de la edificación bajo el suelo.
- Profundidad de la edificación bajo el suelo.
- Fecha de Construcción de la edificación.

Se han representado las parcelas catastrales de los tres municipios estudiados, señalizándolos mediante un código de colores según su fecha de construcción. En las figuras 2.3, 2.4 y 2.5 aparecen representados los centros urbanos de las ciudades de Granada, Lorca y Almería, respectivamente:

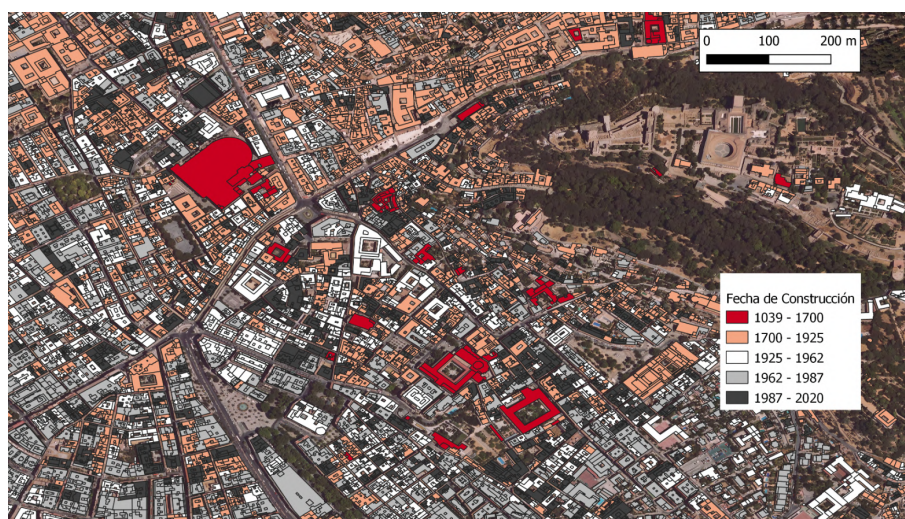


Figura 2.3 Edificaciones existentes en la ciudad de Granada en función de su año de construcción.

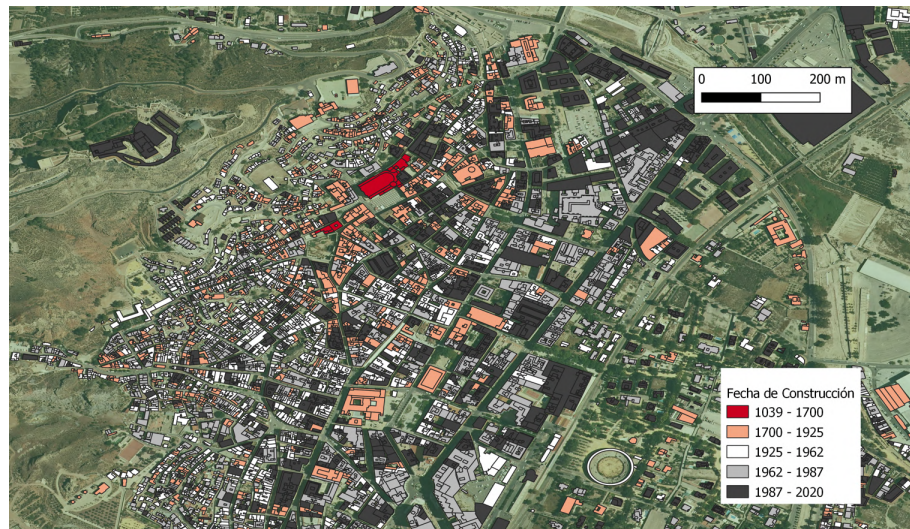


Figura 2.4 Edificaciones existentes en la ciudad de Lorca en función de su año de construcción.



Figura 2.5 Edificaciones existentes en la ciudad de Almería en función de su año de construcción.

2.3 Geología

A través de la web del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) se ha obtenido el mapa de movimientos del terreno con formato WMS, el cual ha sido procesado gracias al software QGIS. Se adjunta en la Figura 2.6 las afecciones a considerar en los tres emplazamientos estudiados:

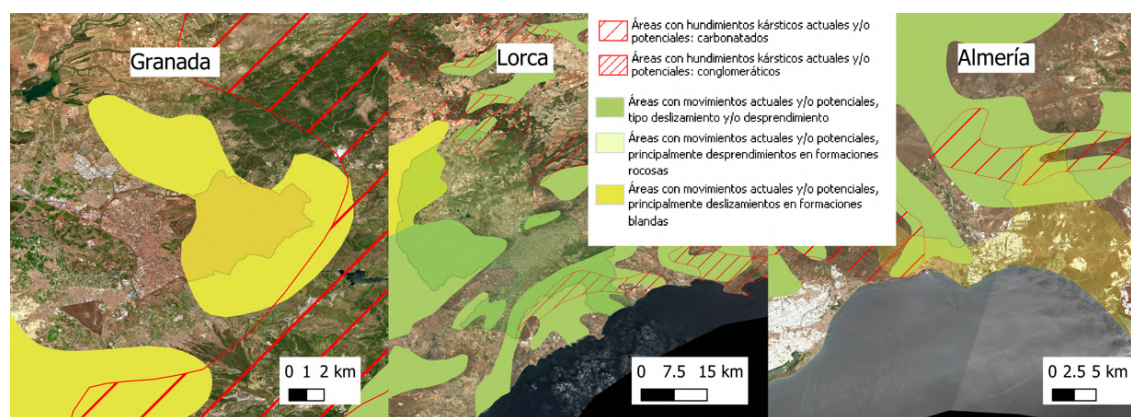


Figura 2.6 Mapa de Movimientos Verticales del Terreno. Escala 1:1.000.000. Fuente: IGME.

Además, se han obtenidos datos geológicos del terreno, también del IGME, en concreto de sus hojas MAGNA 50 (Mapa Geológico Nacional, escala 1:50.000) en formato shape. Se adjuntan en las Figuras 2.7, 2.8 y 2.9 el conjunto de litologías principales presentes en las localizaciones de estudio:

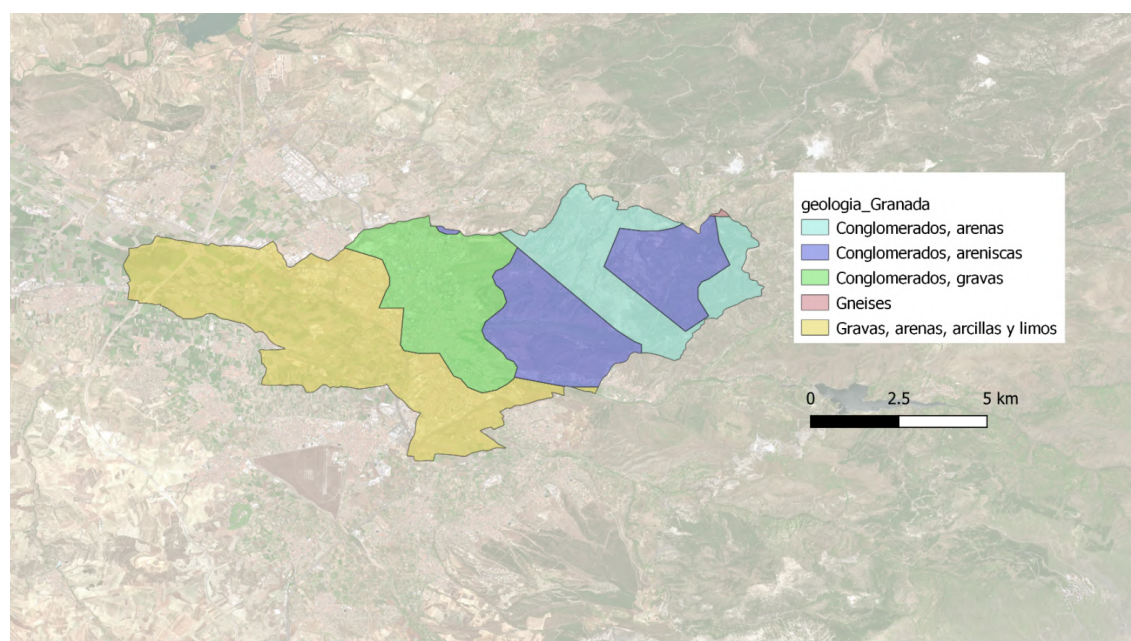


Figura 2.7 Principales litologías presentes en el Municipio de Granada. Fuente: IGME.

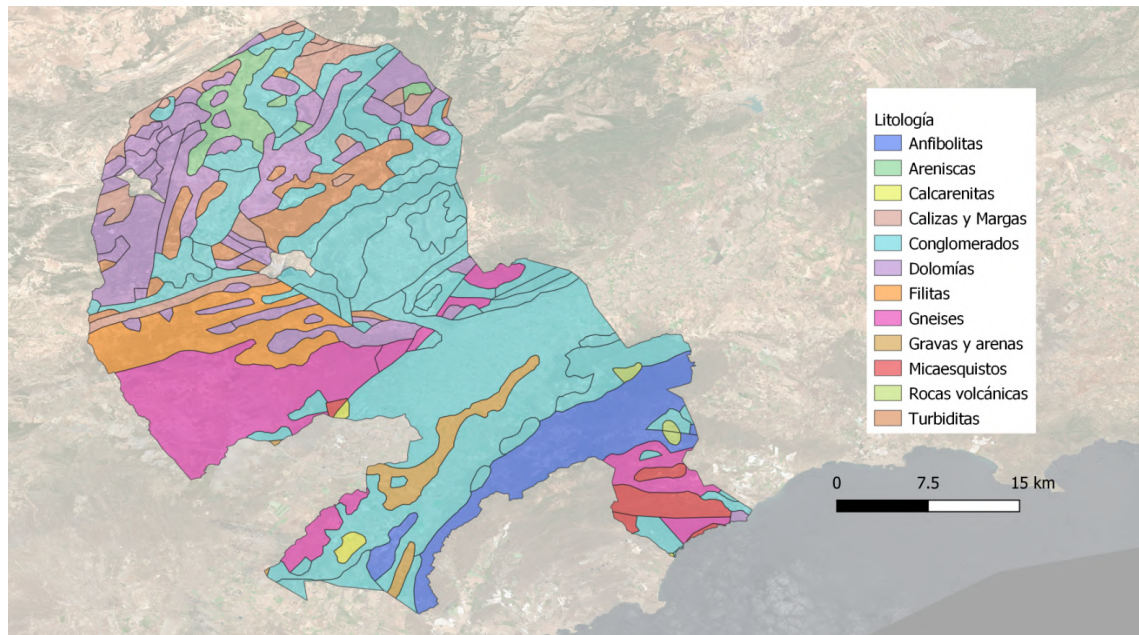


Figura 2.8 Principales litologías presentes en el Municipio de Lorca. Fuente: IGME.

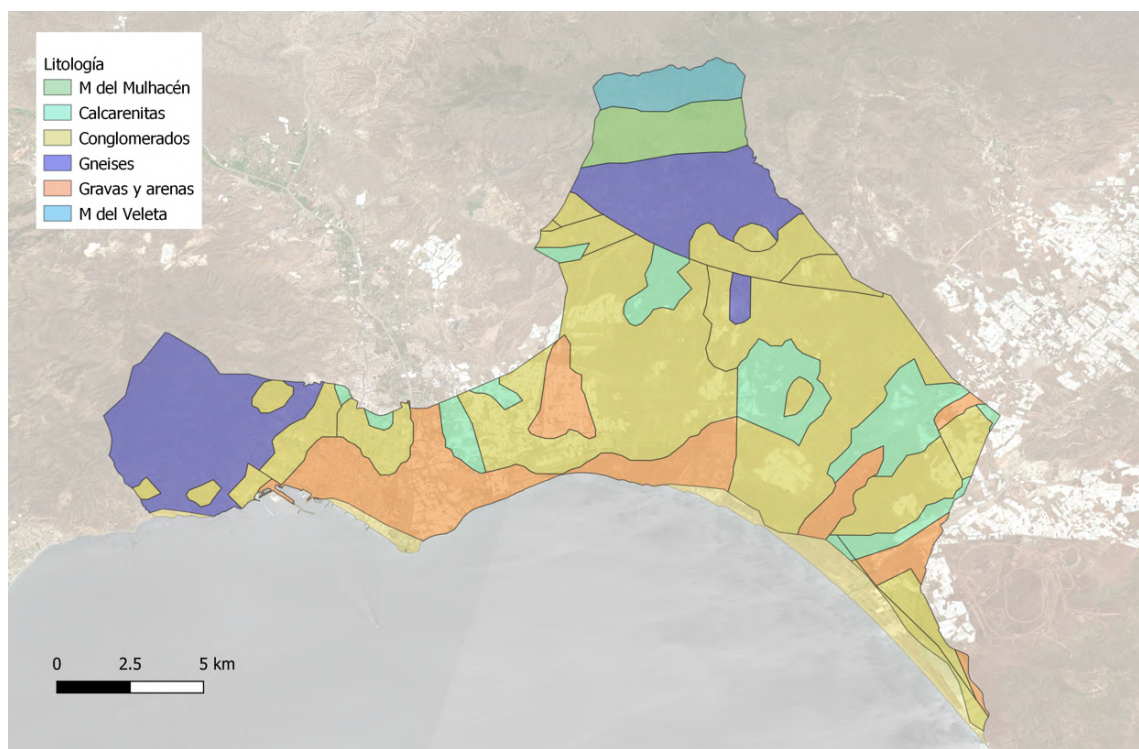


Figura 2.9 Principales litologías presentes en el Municipio de Almería. Fuente: IGME.

2.4 Meteorología

Se ha acudido a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la consulta, descarga y representación de los datos meteorológicos de las tres áreas de estudio. Su fuente *AEMET Open Data* cuenta con multitud de información libre y gratuita, previa solicitud y registro.

En la Figura 2.10 se incluye los climogramas y pluviogramas correspondientes con las tres localizaciones de estudio, donde se representa las temperaturas y precipitaciones a nivel medio mensual de un registro de más de 100 años:

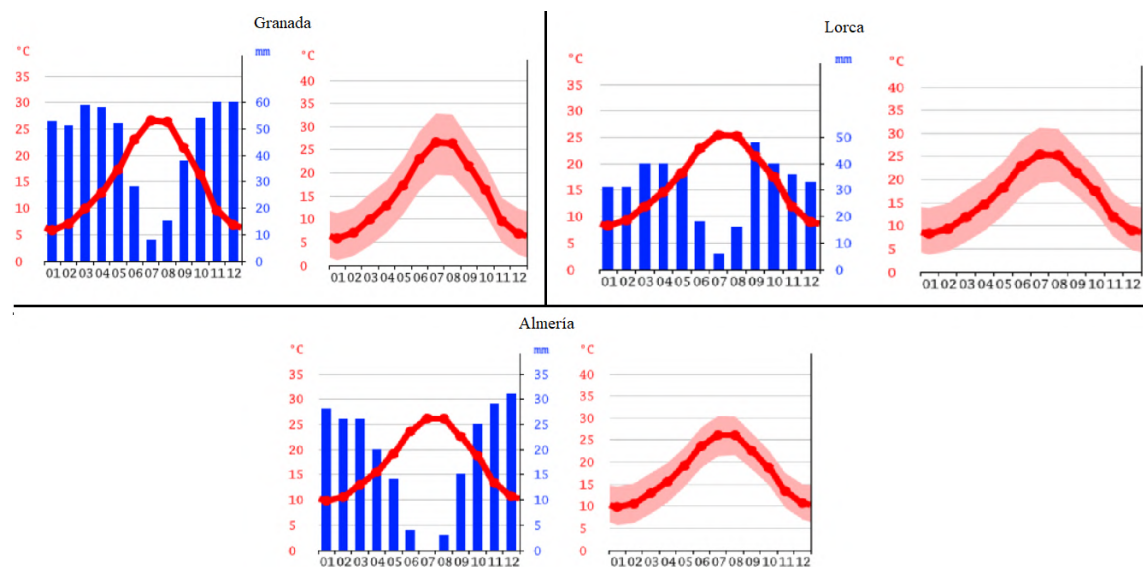


Figura 2.10 Climogramas y pluviogramas de las ciudades de Granada, Lorca y Almería Fuente: *en.climate-data.org*.

Una vez descargados los datos de precipitaciones en formato alfanumérico, se han representado las gráficas de las Figuras 2.11, 2.12 y 2.13:

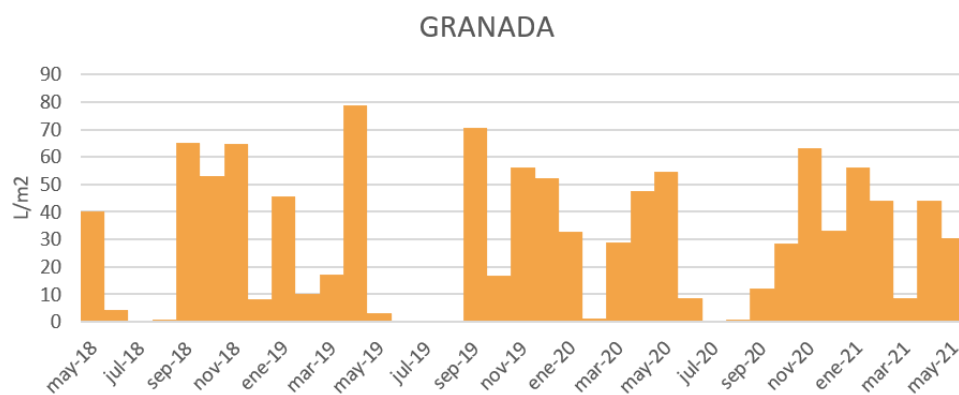


Figura 2.11 Precipitaciones media mensual en el intervalo 2018-2021 en la ciudad de Granada. Fuente: AEMET.

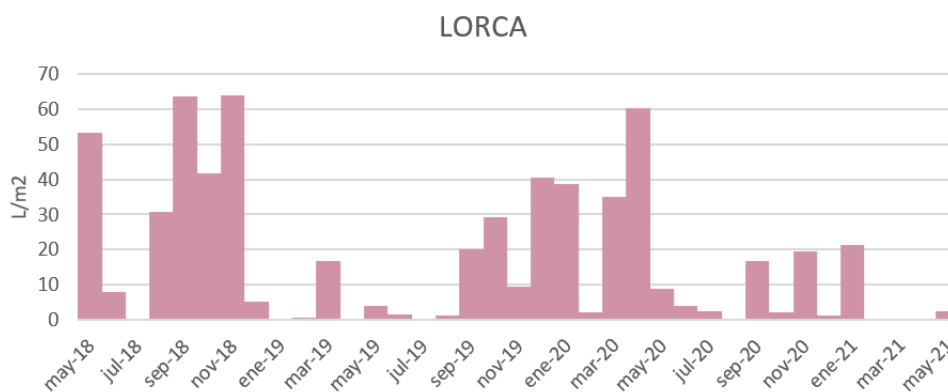


Figura 2.12 Precipitaciones media mensual en el intervalo 2018-2021 en la ciudad de Lorca. Fuente: AEMET.

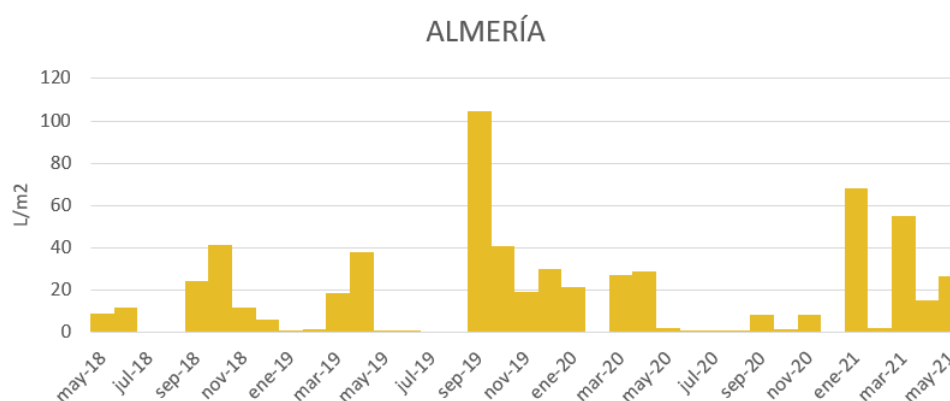


Figura 2.13 Precipitaciones media mensual en el intervalo 2018-2021 en la ciudad de Almería. Fuente: AEMET.

Una vez expuestos estos datos, se puede apreciar como en el caso de Granada, por su lejanía a la costa, cuenta con temperaturas más extremas tanto en invierno como en verano, a diferencia de Lorca y Almería, donde el efecto del mar suaviza claramente las temperaturas. Las precipitaciones medidas durante el período de estudio ponen de manifiesto las características del terreno de cada zona. En el caso de Almería, la ausencia de estas durante casi todo el año y la torrencialidad existente en el mes de septiembre propicia el ciclo hidrológico de los torrentes de la zona, ríos prácticamente secos todo el año con episodios esporádicos de altos caudales muy concentrados.

2.5 Nivel Freático

Se han consultado los niveles piezométricos de las localizaciones estudiadas. De los repositorios oficiales de las demarcaciones hidrográficas pertinentes se han descargado los datos con el objetivo de encontrar irregularidades que puedan afectar a los desplazamientos verticales del terreno, debido a la capacidad del mismo de absorción de agua. En la Figura 2.14 se representan los emplazamientos de los tres sondeos y en las Figuras 2.15, 2.16 y 2.17 se adjunta un gráfico resumen de los niveles piezométricos medidos durante el período estudiado para las siguientes estaciones:

- Sondeo 05.32.928 de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (Granada)
- Sondeo PA-12231 de la Confederación Hidrográfica del Segura (Lorca)
- Sondeo de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (Almería).

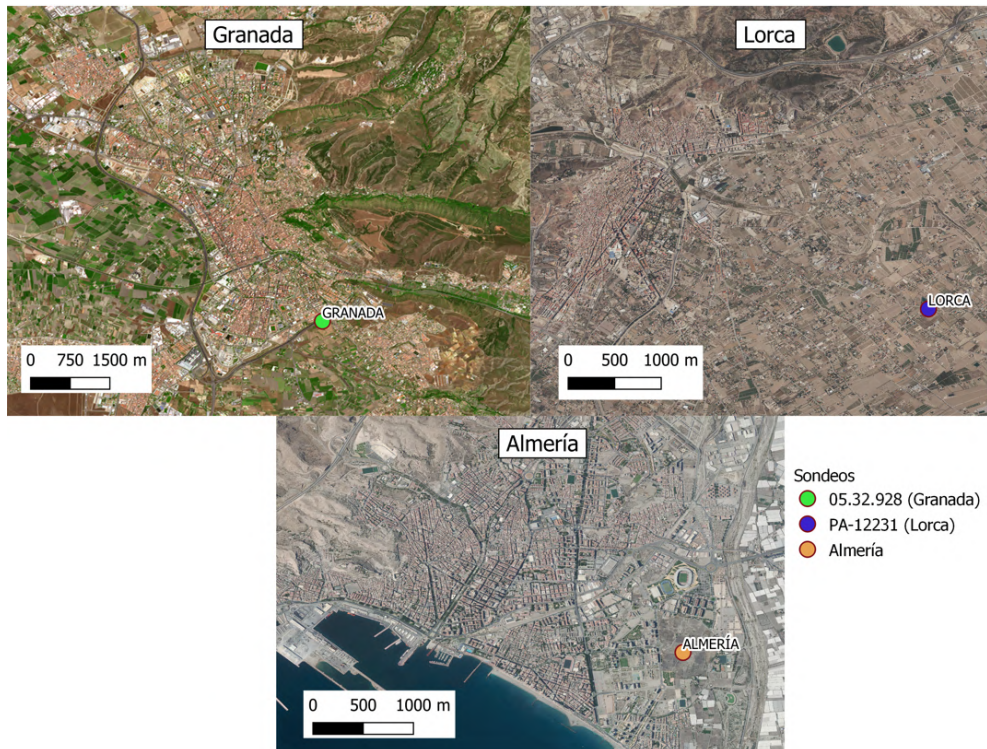


Figura 2.14 Emplazamiento de los tres sondeos analizados en cada una de las ciudades.

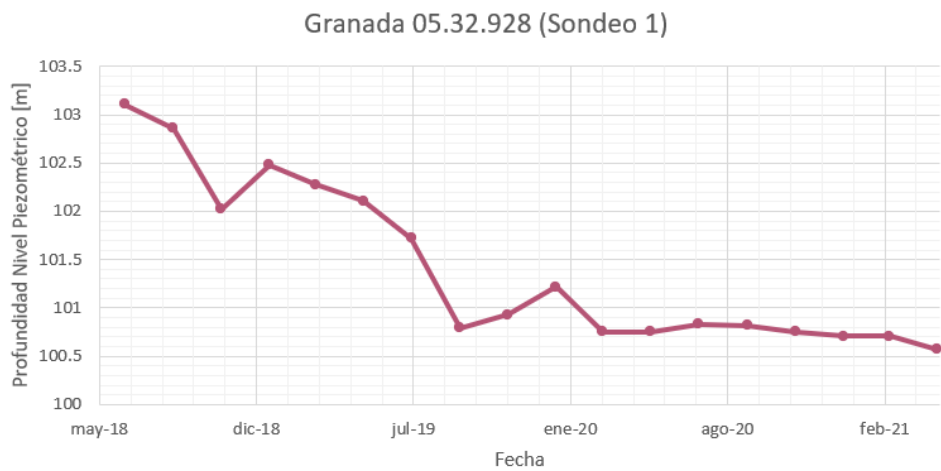


Figura 2.15 Profundidad del nivel piezométrico para el sondeo situado en Granada.

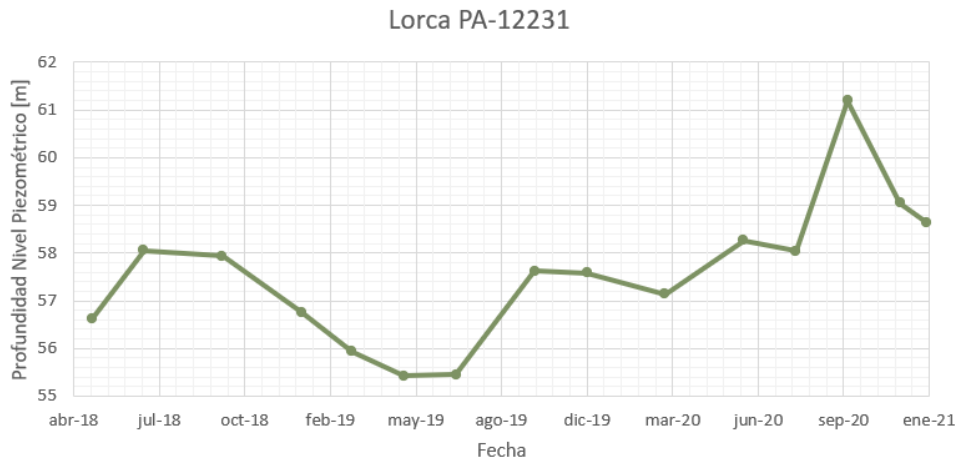


Figura 2.16 Profundidad del nivel piezométrico para el sondeo situado en Lorca.

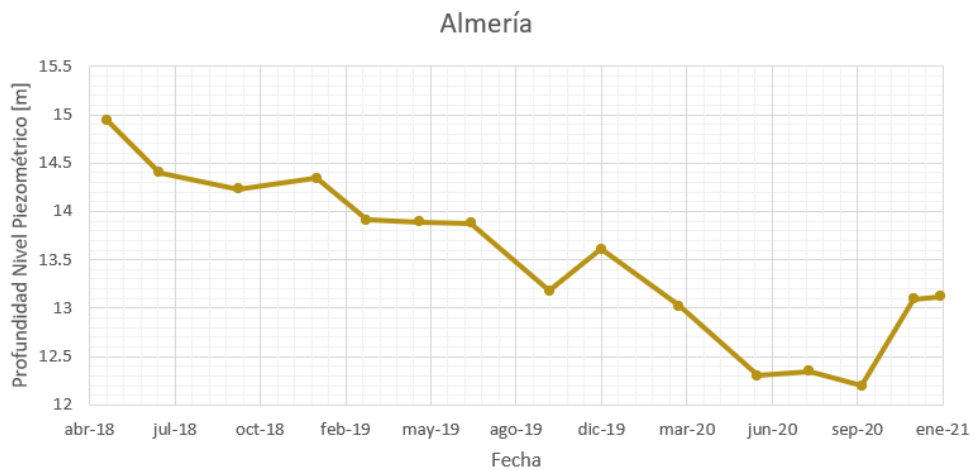


Figura 2.17 Profundidad del nivel piezométrico para el sondeo situado en Almería.

Como reflexión acerca de estos datos, se puede ver que en el caso de Lorca, el nivel piezométrico ha sufrido una tendencia ascendente en el período comprendido entre los años 2018 y 2021, mientras que, por el contrario, en Almería y Granada ha descendido la capa freática del subsuelo, significando esto una pérdida de volumen de agua en los acuíferos bajo esta superficie.

3 Metodología

3.1 Marco teórico del cálculo DinSAR

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es un sistema de obtención de imágenes de alta resolución por microondas. Su funcionamiento se basa en el envío de pulsos electromagnéticos a la Tierra con el objetivo de grabar su retorno una vez reflejado por la superficie y obtener así imágenes del área que ilumina. Al no utilizar únicamente luz visible, sino otras bandas del espectro electromagnético como infrarroja, microondas y ultravioleta (Figura 3.2), no necesitan fuentes de iluminación, por lo que puede operar tanto de día como de noche. Además, debido al empleo de microondas, estas señales se ven muy poco afectadas por las condiciones atmosféricas, las cuales se pueden considerar transparentes para el radar.

Podemos decir que la característica distintiva del SAR frente a otros sistemas es la consecución de altas resoluciones en la dirección del movimiento del sensor mediante la síntesis de una antena de grandes dimensiones a partir de una antena real más pequeña.

La interferometría es una familia de técnicas que consisten en combinar la luz (u otras ondas electromagnéticas) proveniente de diferentes receptores, telescopios o antenas de radio para obtener una imagen de mayor resolución aplicando el principio de superposición (Hariharan, 2007). En el presente apartado se explicará la metodología seguida de manera teórica, realzando la diferencia entre (Figura 3.1):

- Técnica InSAR
- Técnica DinSAR
- Técnica PSI

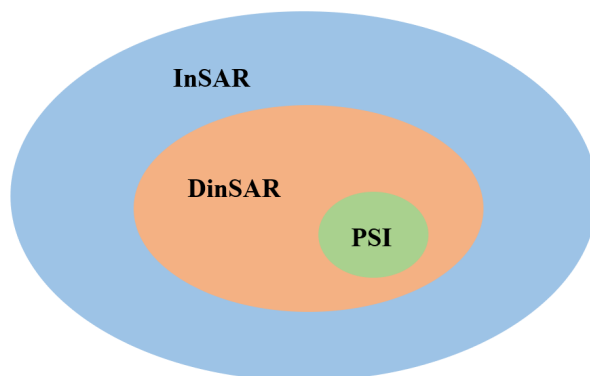


Figura 3.1 Metodologías SAR.

3.1.1 Metodologías InSAR y DinSAR

Un SAR puede observar la misma zona desde ángulos de visión ligeramente diferentes. Esto puede hacerse simultáneamente (con dos radares montados en la misma plataforma) o en momentos diferentes aprovechando las órbitas repetidas del mismo satélite. La distancia entre los dos satélites (u órbitas) en el plano perpendicular a la órbita se denomina línea de base del interferómetro y su proyección perpendicular al rango de inclinación es la línea de base perpendicular.

La Interferometría SAR (InSAR) es una técnica basada en el proceso y análisis de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen. A partir de interferometría, los datos obtenidos son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, calculados mediante la medición de tiempos y desfases. InSAR se utiliza sobre todo para la generación de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) para convertir las diferencias de fase entre dos imágenes en alturas relativas. Para obtener alturas absolutas se necesita un MDE de referencia.

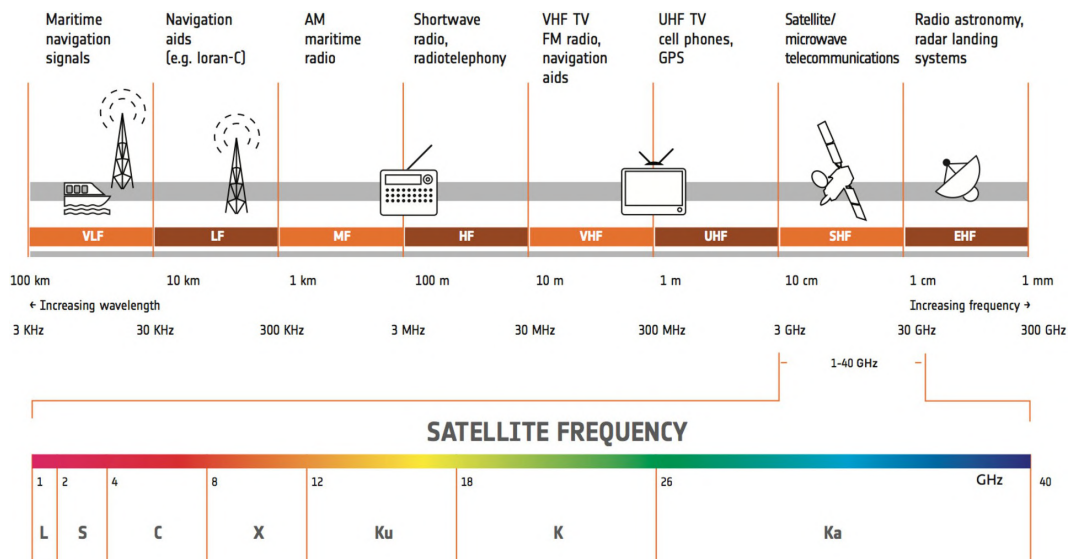


Figura 3.2 Bandas de frecuencia satelitales. Fuente: ESA.

La D de DinSAR significa "diferencial", es decir, se utiliza para observar los cambios de fase entre dos imágenes en un tiempo determinado. Se utiliza para controlar el hundimiento/elevación o la deformación lateral. Esta técnica permite, a partir de 2 pases interferométricos del sensor SAR, generar el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y la coherencia relativa, entre otras aplicaciones. Así pues InSAR consiste en medir las diferencias de fase entre el satélite y la tierra en dos pasos del satélite por la misma zona (Figura 3.3).

Estas diferencias de fase en función de la distancia pueden ser debidas a dos motivos: en primer lugar, a la diferencia de posición entre las dos trayectorias del satélite, hecho que permite medir la topografía del terreno; en segundo lugar, a un desplazamiento de la zona observada entre las dos adquisiciones, que puede ser causado por varios fenómenos, como un terremoto o una subsidencia del terreno debida a la construcción de un túnel. De esta forma, "la interferometría SAR (InSAR) es una técnica que permite la detección de movimientos y deformaciones de

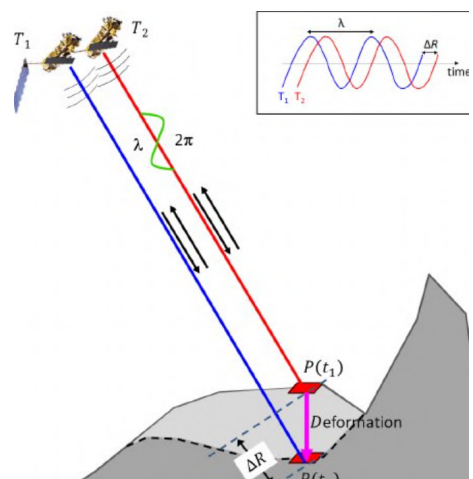


Figura 3.3 Esquema de adquisición de datos en caso de subsidencia. Principio básico DinSAR. (Fuente: Sousa, 2013).

la superficie terrestre” (Martínez, 2005).

La señal reflejada se ve afectada por varios parámetros como son la atmósfera, el ruido y los movimientos en la superficie. En el caso de movimientos o deformaciones en la superficie (Figura 3.3), la metodología de cálculo es la siguiente: se tiene un punto P que se ha desplazado a un punto P' durante el tiempo entre una adquisición y la otra. De esta forma la fase interferométrica se ve afectada por varios parámetros, según se presenta en la siguiente ecuación (3.1 y 3.2):

$$\phi_{Int} = \phi_S - \phi_M \rightarrow \phi_{Int} = \frac{SP - MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \frac{SP' - MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \phi_{Atm} + \phi_{Ruido} \quad (3.1)$$

$$\phi_{Int} = \phi_{Topo} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} + \phi_{Ruido} \quad (3.2)$$

Donde:

- ϕ_S y ϕ_M son las fases interferométricas de la posición del satélite esclavo y maestro.
- ϕ_{Atm} es la contribución de la atmósfera
- ϕ_{Ruido} es la componente debida al ruido.
- ϕ_{Topo} es la componente debida a la topografía del terreno.
- ϕ_{Mov} es la componente debida al movimiento o deformación.
- SP es la distancia del satélite esclavo al punto, siendo P' el punto desplazado.
- MP es la distancia del satélite maestro al punto
- λ es la longitud de onda radar.

El análisis DinSAR puede ser multitemporal, es decir, que se adquieren los pares de imágenes a lo largo del tiempo, para seguir movimientos de varios meses o años. Existen distintas técnicas para el procesamiento DinSAR; por ejemplo, la obtención de los desplazamientos se realiza a partir de las zonas alejadas del fenómeno (volcán, falla, deslizamiento), zonas que se suponen libres de cambios y con geometría constante, lo que permite filtrar ciertas diferencias “no reales”, producidas por cambios atmosféricos. A partir de las zonas alejadas se va “integrando” hacia el centro de la zona de estudio, obteniendo los desplazamientos totales.

Con la técnica de interferometría diferencial DInSAR se puede eliminar el inconveniente planteado en InSAR debido a que la deformación se encuentra mezclada con la señal topográfica, ya que se despeja ésta del interferograma, obteniéndose el interferograma diferencial SAR. La técnica DInSAR se utiliza para detectar y medir movimientos muy pequeños de la superficie. Para poder detectar deformaciones tan pequeñas hay que deshacerse de la componente de topografía. Después de descomponer la fase obtenida se calcula la magnitud del movimiento. Dada la pequeña longitud de onda en la que se opera, se detectan movimientos subcentimétricos.

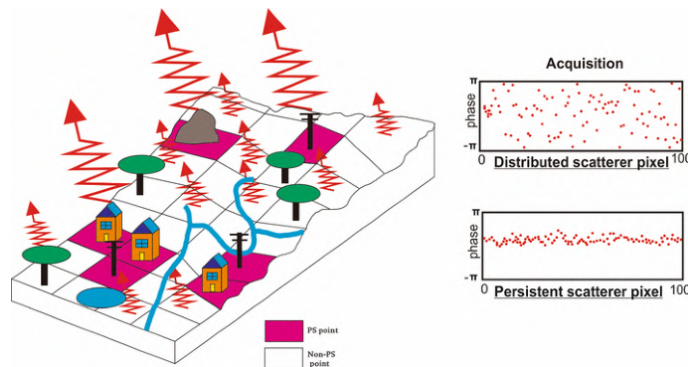


Figura 3.4 Funcionamiento de la metodología PSI. Los píxeles en rosa son los que cuentan con sólidas referencias altimétricas, las cuales no son susceptibles de cambio brusco en el tiempo. (Fuente: Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) in monitoring slope movements in Nainital, Uttarakhand Lesser Himalaya, India. Yhokha y Goswami, 2018).

3.1.2 Metodología PSI

La interferometría SAR de Dispersión Persistente (*Persistent Scatter InSAR, PSI*) es una técnica derivada de la anterior, la cual se basa en la medición de movimientos del terreno en puntos de dispersión persistente, los cuales son seleccionados previamente y se caracterizan por ser tales como los tejados de edificios, estructuras metálicas y elementos naturales destacados y permanentes. Esta técnica ofrece la posibilidad de obtener un registro de movimientos históricos de más de una década para cada punto de dispersión persistente individual (Figura 3.3).

Además, para verificar subsidencias se pueden emplear pasadas ascendentes y descendentes de la zona, ya que si en ambas los desplazamientos son negativos, se trata de una subsidencia. Sin embargo, si el sentido de los desplazamientos difiere entre ambas pasadas, estaremos hablando de un deslizamiento.

3.2 Software SARPROZ

SARPROZ es un software muy potente y versátil que implementa una amplia gama de técnicas de procesamiento de radar de apertura sintética (SAR), SAR interferométrico (InSAR) e InSAR multitemporal. Se fundamenta en la reflectividad de los objetivos puntuales frente a distintas situaciones de iluminación e inclinación, procesando y extrayendo información de las amplitudes de las imágenes radar.

Originalmente, el código fue desarrollado para resolver el problema específico de combinar coherentemente datos con diferentes longitudes de onda, como es el caso de la interferometría cruzada ERS y Envisat, mediante una técnica avanzada de PSI (Perissin, 2006a). Este problema está directamente relacionado con la naturaleza física de los objetos de radar y su capacidad de ser visibles bajo determinados ángulos de observación o frecuencias de iluminación. Así, se desarrolló un módulo de caracterización y reconocimiento de objetivos, siendo también posible procesar y extraer información de la amplitud de las imágenes de radar (Perissin, 2007). Como consecuencia, la necesidad de uso de las series temporales propició la creación de dicho módulo.

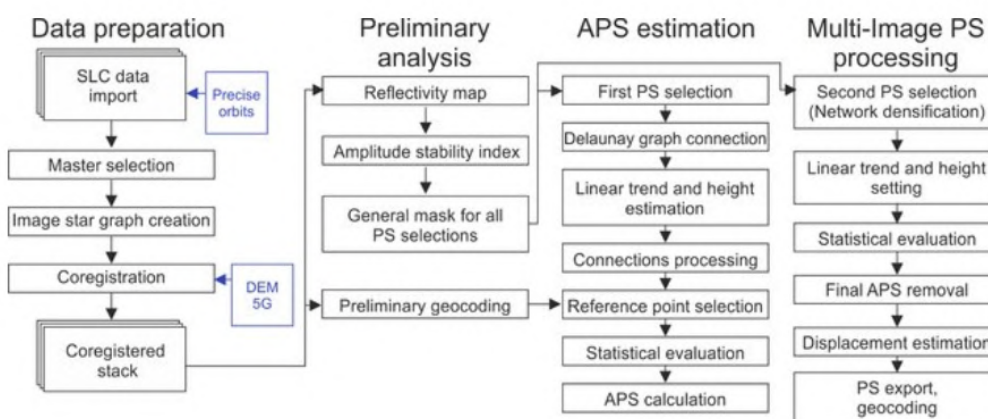


Figura 3.5 Resumen de la Metodología SARPROZ. Fuente: Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic (Farova, 2019).

El software está equipado con un módulo de caracterización y reconocimiento de objetivos, capaz de procesar y extraer información también de la amplitud de las imágenes de radar (Perissin, 2007). A su vez, cuenta con técnicas para mejorar la estimación de la altitud del objetivo y la georreferenciación (Perissin, 2006), así como opciones para combinar grandes conjuntos de datos, permitiendo al usuario elegir qué

conjunto de interferogramas desea procesar y qué técnicas aplicar.

Por último, cabe destacar su gran comodidad en cuanto a la exportación de los resultados, pudiendo exportar y georreferenciar la información obtenida a software GIS para su visualización como es el caso de Google Earth, o para su modificación y procesamiento en el caso de QGIS. Al tratarse de una herramienta de investigación en continuo desarrollo por sus creadores, las funcionalidades del software se expanden y se reducen sus posibles fallos y problemas.

En el presente apartado se explicará la metodología seguida para el procesamiento de las imágenes radar hasta la obtención de los desplazamientos verticales en el terreno, uno de los objetivos de este estudio.



Figura 3.6 Software SARPROZ, creado por Daniele Perissin, investigador en la Purdue University (Indiana, EEUU) y en la Universidad Politécnica de Milán (Italia).

3.2.1 Preparación de la información

Una vez descargadas y descomprimidas las imágenes radar necesarias para la realización de la primera simulación, se guardarán en una carpeta llamada *SLC*, teniendo en cuenta que la longitud del directorio no debe sobrepasar los 256 caracteres. Es por esto que se recomienda emplazarlas directamente en el disco local o externo.

El modo de barrido interferométrico amplio (IW) escogido para las imágenes utilizadas es el principal modo de adquisición sobre tierra y satisface la mayoría de los requisitos del servicio. Adquiere datos con una franja de 250 km con una resolución espacial de 5 m por 20 m (single look). El modo IW captura tres sub-surcos (subswaths) utilizando la Observación del Terreno con Escáneres Progresivos SAR (TOPSAR). En la Figura 3.5 aparece reflejado este concepto de manera esquemática:

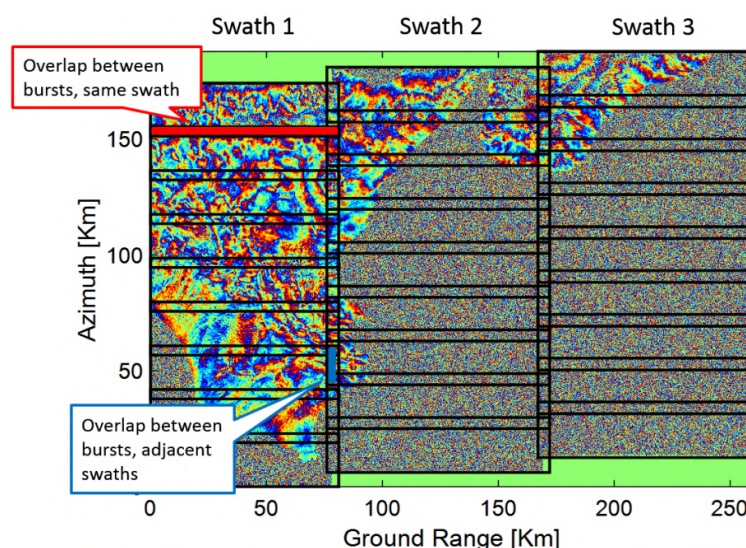


Figura 3.7 División de una imagen radar IW en tres sub-surcos. Fuente: Diapositivas utilizadas en un workshop organizado por la ESA en Roma los días 23-27 de marzo de 2015.

Ejemplificando esto al caso de estudio, se adjunta en la Figura 3.6 una imagen radar del 23 de mayo de 2018 sobre la que se aprecia la posición de la ciudad de Granada en el segundo sub-surco:

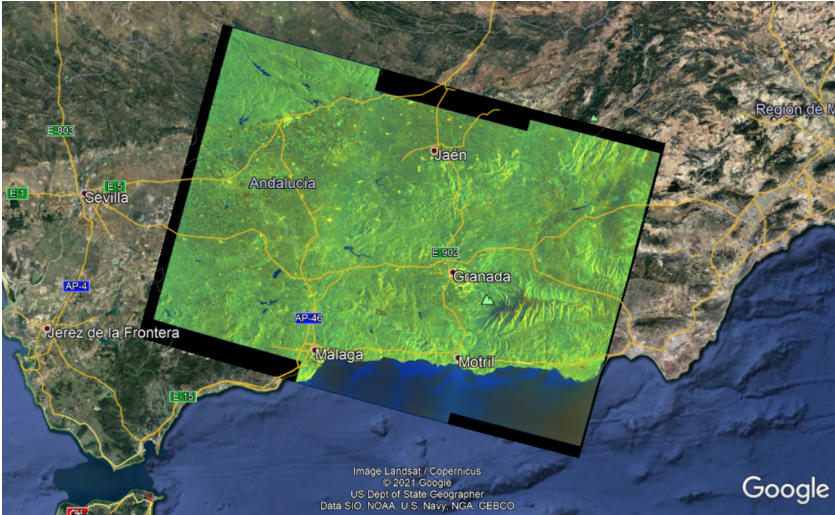


Figura 3.8 Imagen S1A _ IW _ SLC _ 1SDV _ 20180523T061845 _ 20180523T061912 _ 022028 _ 026157 _ 8426 representada en Google Earth.

Además, es necesario delimitar el área de estudio para así optimizar el rendimiento del software, obligándole a calcular los resultados únicamente donde nos hace falta. Se adjunta una tabla resumen que agrupa todos los parámetros escogidos en las seis simulaciones realizadas, para cada una de las tres localizaciones y para cada uno de las dos orientaciones, ascendentes y descendentes, así como la Figura 3.9, donde se representan los recintos analizados mediante SARPROZ en sus dos orientaciones:

Tabla 3.1 Parámetros escogidos en las simulaciones realizadas en SARPROZ.

		Granada		Lorca		Almería	
		Descendente	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente	Ascendente
Fechas	2018	23-may	29-may	18-may	29-may	18-may	29-may
	2019	18-may	12-may	01-may	12-may	01-may	12-may
	2020	24-may	06-may	31-may	06-may	31-may	06-may
	2021	19-may	25-may	26-may	25-may	26-may	13-may
Subswath		1	2	3	2	2	2
Polarización		VV	VV	VV	VV	VV	VV
Coordenadas	Longitud	37.1772		37.6714		36.8378	
	Latitud	-3.5942		-1.6903		-2.4344	
	Radio [km]	4		3		4	

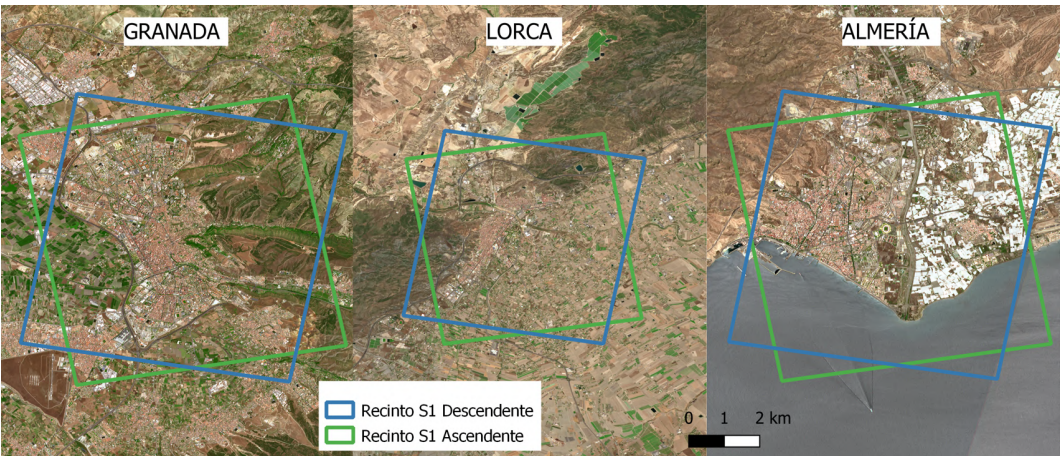


Figura 3.9 Recintos analizados en las tres localizaciones, en función de la orientación escogida.

Por último, se escogerá automáticamente una de las imágenes introducidas como la Maestra, y se realizará:

- Extracción de la imagen maestra (*Master Image*)
- Extracción de las imágenes esclavas (*Slave Images*): las cuales podrán quedar un poco desalineadas.
- Corregistro (*Co-registration*): entonces las imágenes se alinearán con la considerada como maestra. Se aproximan los desplazamientos definiendo puntos en común entre ambas imágenes, sea visualmente o empleando las órbitas del satélite

3.2.2 Análisis Preliminar

Ahora será necesario realizar cuatro tareas previas:

- Mapa de Reflectividad (*Reflectivity Map and Amplitude Stability Index*): con esta función se genera un mapa que contiene la media temporal de todas las imágenes del conjunto de datos que se han elegido para procesar.
- Máscara para la selección de puntos dispersos (*Mask for sparse points selection*): con esta función se seleccionarán los puntos a procesar. Se pueden escoger mediante dos métodos:
 - De forma clásica, escogiendo un parámetro y definiendo un umbral en él.
 - De forma estadística, extrayendo los máximos locales, aplicando un umbral a la amplitud, o suprimiendo los lóbulos laterales de la distribución de resultados.
- Selección de Punto de Control (*GCP, Ground Control Point*): son puntos de coordenadas conocidas. Son muy útiles para calibrar el modelo. Se seleccionará de manera automática en función de la órbita ya existente.
- MDE externo y amplitud sintética en coordenadas SAR (*External DEM and synthetic amplitude in SAR coordinates*).

3.2.3 Estimación de la Pantalla de Fase Atmosférica

En este apartado se eliminará la componente atmosférica de la amplitud de fase interferométrica en la señal radar, con el objetivo de detectar las deformaciones de la superficie. El software solicita la información que aparece en la Figura 3.10:

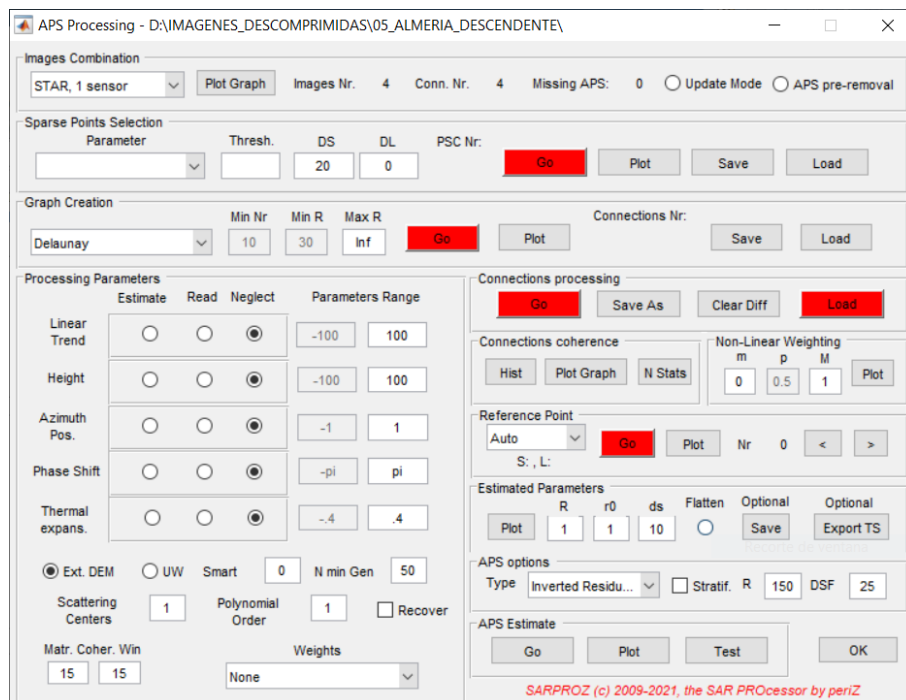


Figura 3.10 Módulo APS del software SARPROZ..

Los valores a introducir son los siguientes (Tabla 3.2):

Tabla 3.2 Parámetros empleados en la eliminación de la pantalla de fase atmosférica en SARPROZ.

Pantalla de Fase Atmosférica	Sparse Points Selection		
	Parámetro		Umbral
	Amp Stab Index 1-sigma/mu		0.85
	Graphic Creation		
	Delaunay		
	Processing Parameters		
	Parámetro		Rango
	Linear Trend	-5	5
	Height	-20	20

3.2.4 Análisis Multi-imagen

En este módulo se implementará la metodología PSI. Se adjunta en la Figura 3.11 la ventana correspondiente a este proceso:

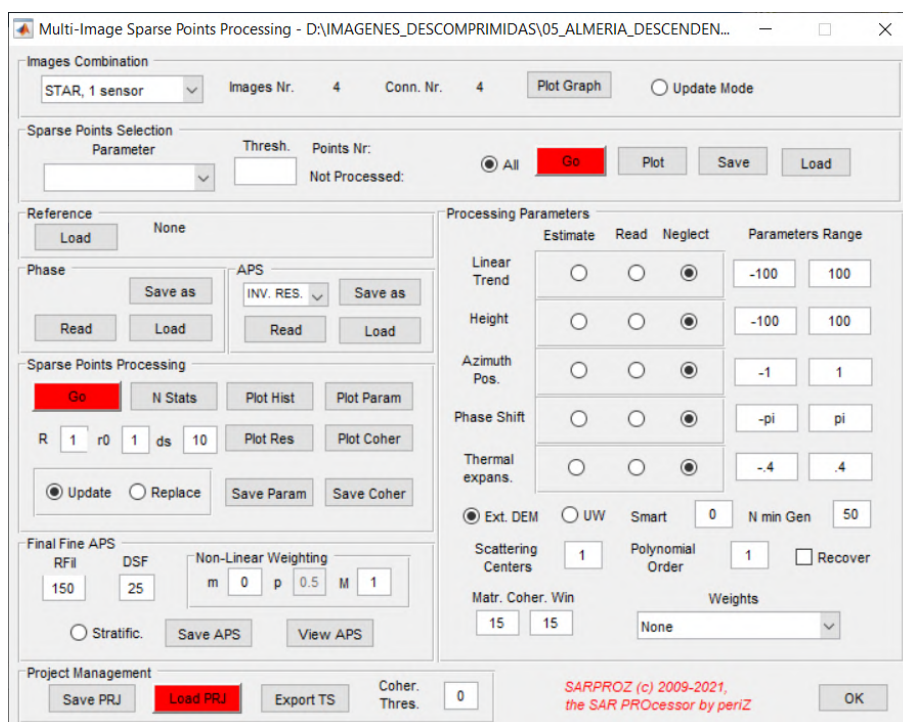


Figura 3.11 Módulo Sparse Points processing del software SARPROZ.

Y de manera análoga al apartado anterior, se adjunta una tabla resumen (Tabla 3.3) con los datos a introducir:

Tabla 3.3 Parámetros empleados en la metodología PSI en SARPROZ.

Análisis Multitemporal	Sparse Points Selection		
	Parámetro		Umbral
	Amp Stab Index 1-sigma/ μ		0.69
	Processing Parameters		
	Parámetro		Rango
	Linear Trend	-10	5
	Height	-10	20
	Save Param	Save PRJ	
	Save Coher	Export TS	

3.2.5 Procesamiento de Resultados

Por último, la gran versatilidad del software hace que las posibilidades de exportación y post procesado de los resultados sean muy amplias. Exigiendo un valor umbral de la coherencia deseada de 0.85, se obtendrán tanto los ficheros CSV con los desplazamientos sufridos por todos los puntos del terreno escogidos en los cuatro intervalos temporales, como los KMZ con la misma información, para su visualización en Google Earth. Se adjunta en la Figura 3.12 a modo de ejemplo la visualización del nodo 26106 del análisis de las imágenes radar descendentes en la ciudad de Almería:

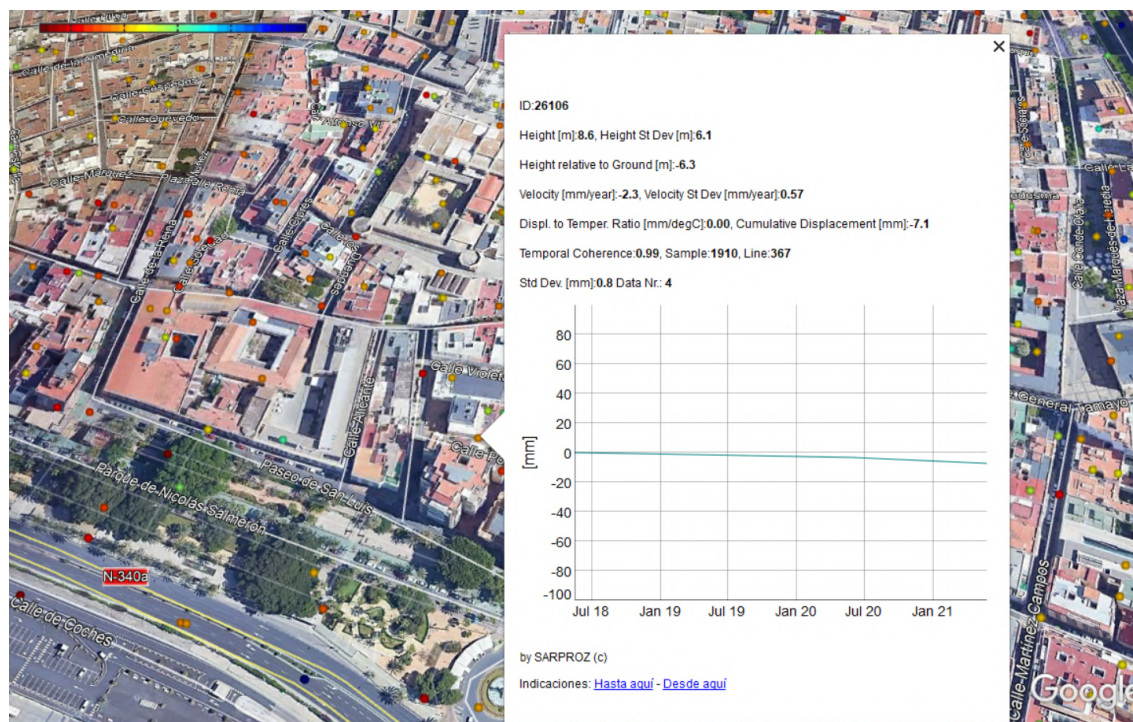


Figura 3.12 Desplazamientos sufridos por el terreno bajo el nodo 26106 en la ciudad de Almería, entre los años 2018 y 2021.

4 Resultados experimentales

Se expondrán los resultados del análisis de subsidencias y su correlación con otros factores.

4.1 Desplazamientos del terreno en SARPROZ

Al haberse estudiado los desplazamientos de las tres ciudades en ambas orientaciones, se cuenta con una enorme cantidad de datos, los cuales, al encontrarse georreferenciados, se superpondrán para su uso de manera simultánea.

Se representa en la Figura 4.1 el caso de Almería, con los desplazamientos acumulados entre 2018 y 2021 en cada una de las dos orientaciones:

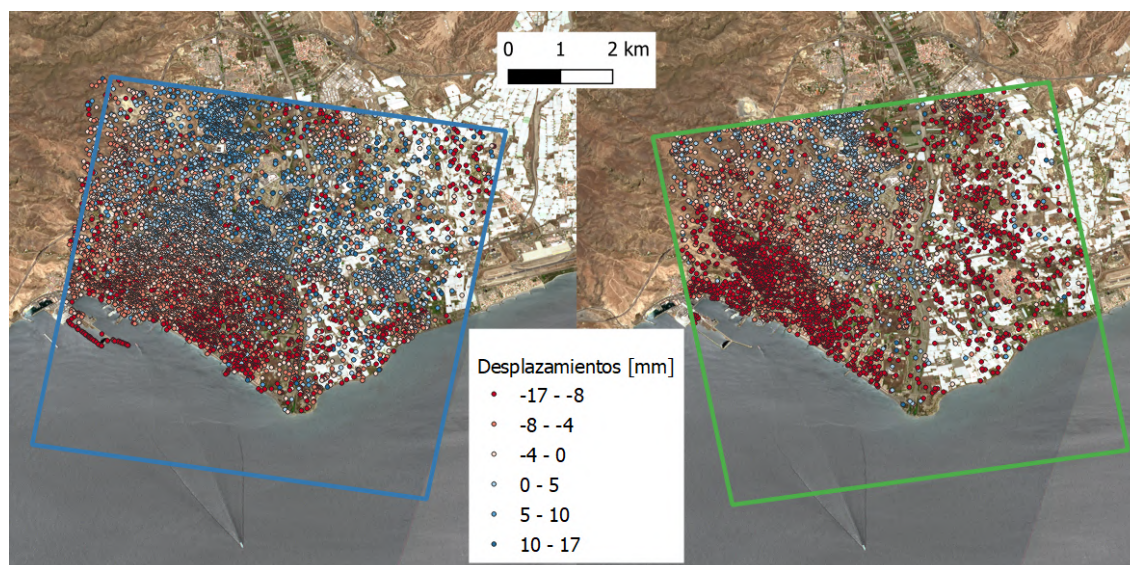


Figura 4.1 Desplazamientos 2018-2021 en Almería para cada una de sus dos órbitas. En la parte derecha la órbita ascendente, y en la izquierda la descendente.

Se aprecia como en la zona cercana a la costa se detectan la mayor parte de subsidencias, sobre todo en las áreas edificadas. Sin embargo, en zonas más despobladas y alejadas de la línea de costa se producen hinchamientos predominantes.

4.1.1 Granada

Se han representado los desplazamientos acumulados en cada intervalo temporal estudiado, donde se aprecia cómo se acentúan cada vez más tanto las subsidencias como los hinchamientos. En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se representan los desplazamientos en los años 2019, 2020 y 2021 respectivamente.

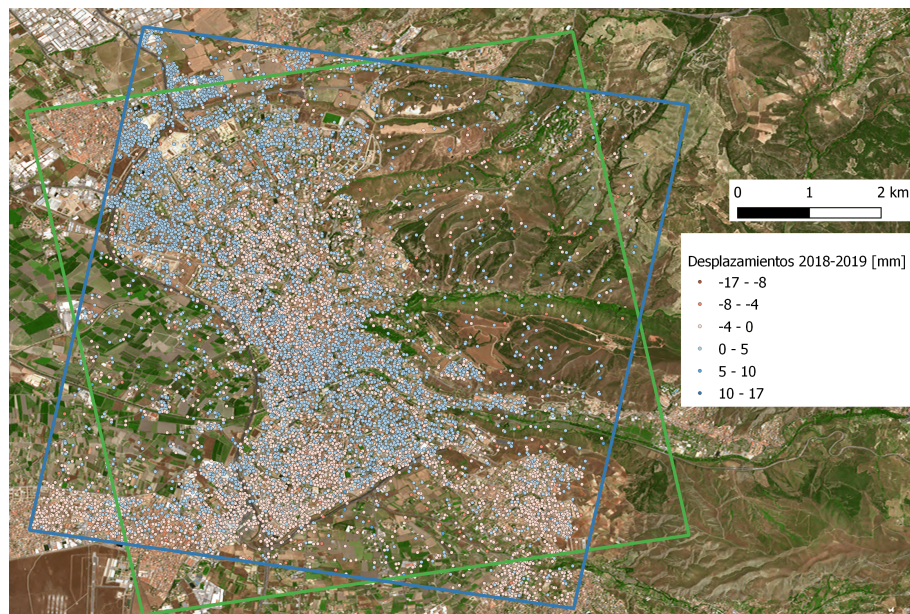


Figura 4.2 Desplazamientos 2018-2019 en Granada, en mm.

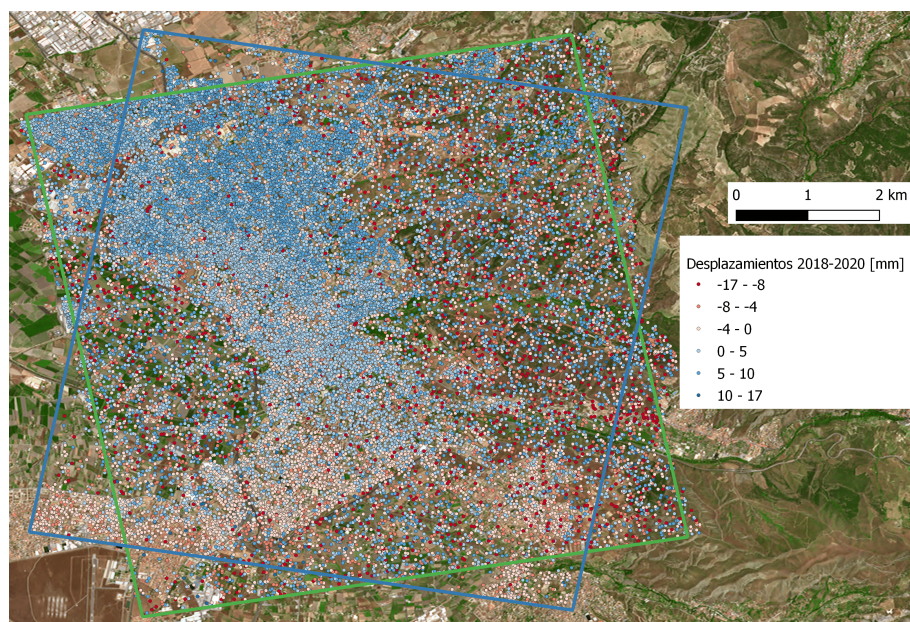


Figura 4.3 Desplazamientos 2018-2020 en Granada, en mm.

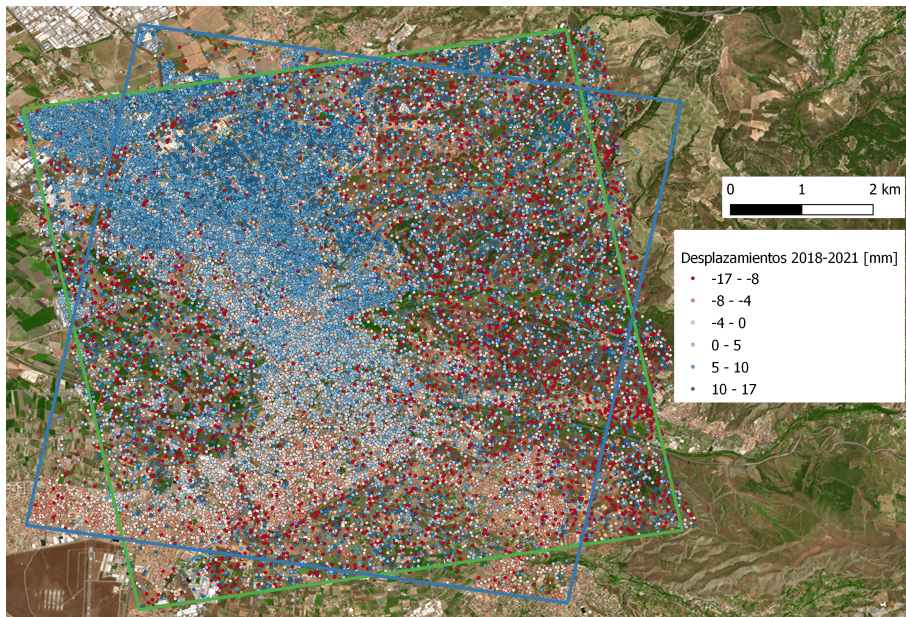


Figura 4.4 Desplazamientos 2018-2021 en Granada, en mm.

4.1.2 Lorca

En la ciudad de Lorca se aprecia una tendencia lineal de la frontera entre las áreas de subsidencia y de hinchamiento, las cuales también se acentúan en cada intervalo temporal. Se adjuntan las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 donde se han representado los desplazamientos en los años 2019, 2020 y 2021 respectivamente.

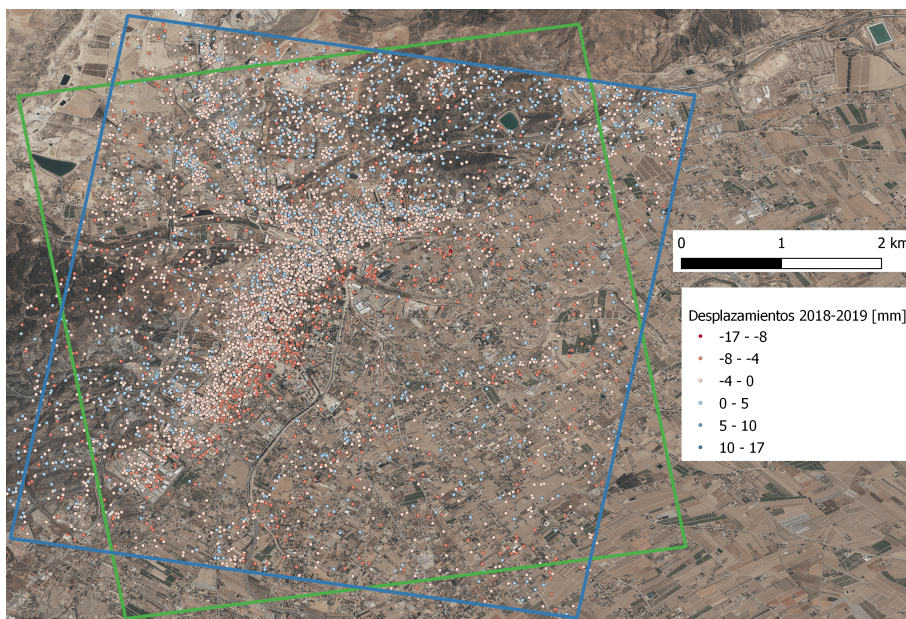


Figura 4.5 Desplazamientos 2018-2019 en Lorca, en mm.

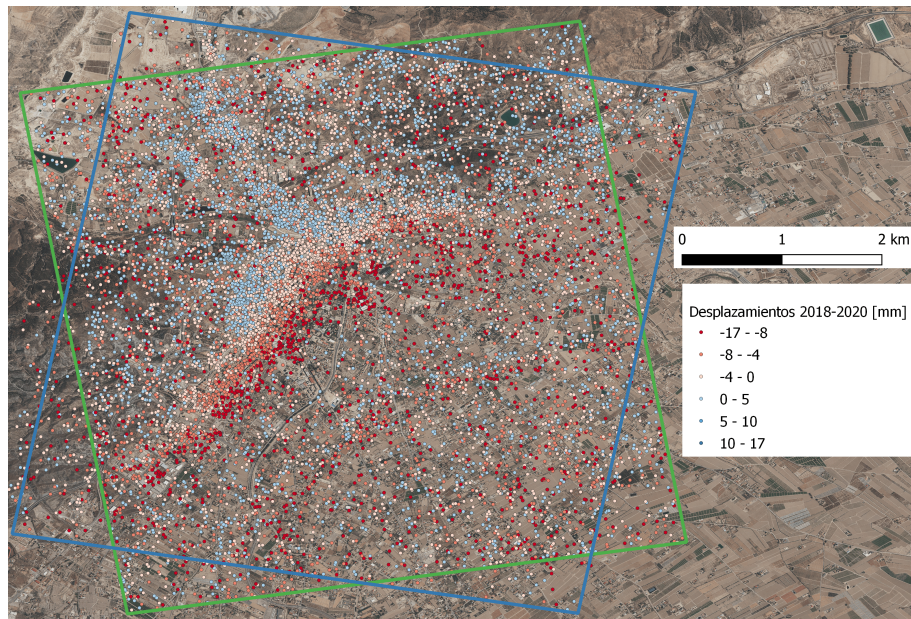


Figura 4.6 Desplazamientos 2018-2020 en Lorca, en mm.

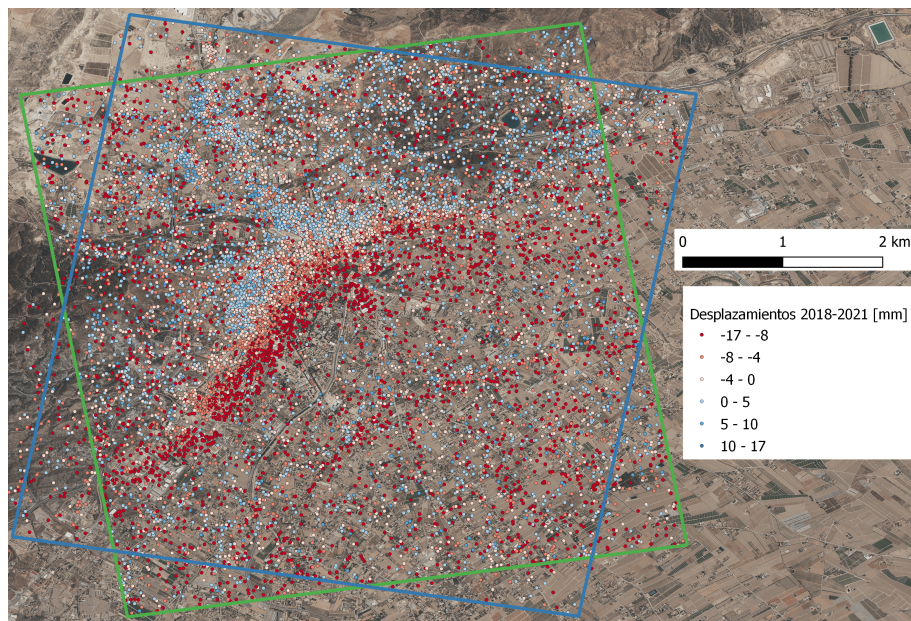


Figura 4.7 Desplazamientos 2018-2021 en Lorca, en mm.

4.1.3 Almería

En el caso de Almería, como ya se especificó en la Figura 4.1, la tendencia subsidente se sitúa geográficamente cercana a la costa, siendo las zonas más alejadas a estas las que cuentan con desplazamientos positivos (hinchamientos). Se representan en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10.

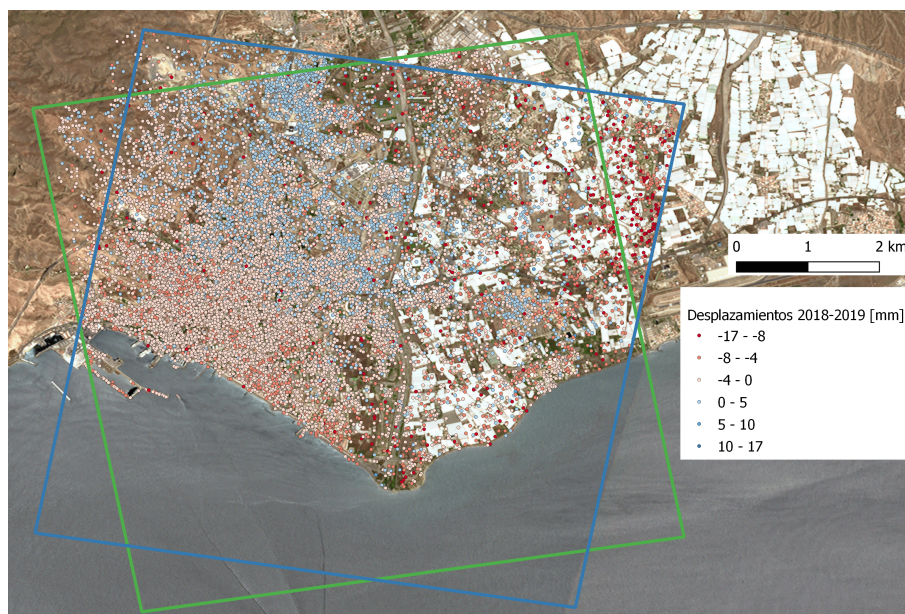


Figura 4.8 Desplazamientos 2018-2019 en Almería, en mm.

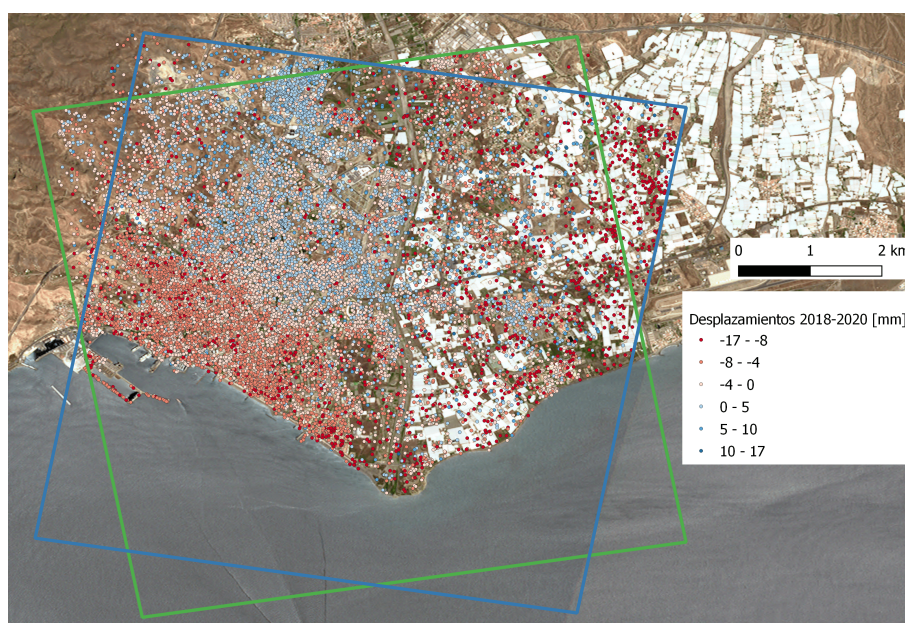


Figura 4.9 Desplazamientos 2018-2020 en Almería, en mm.

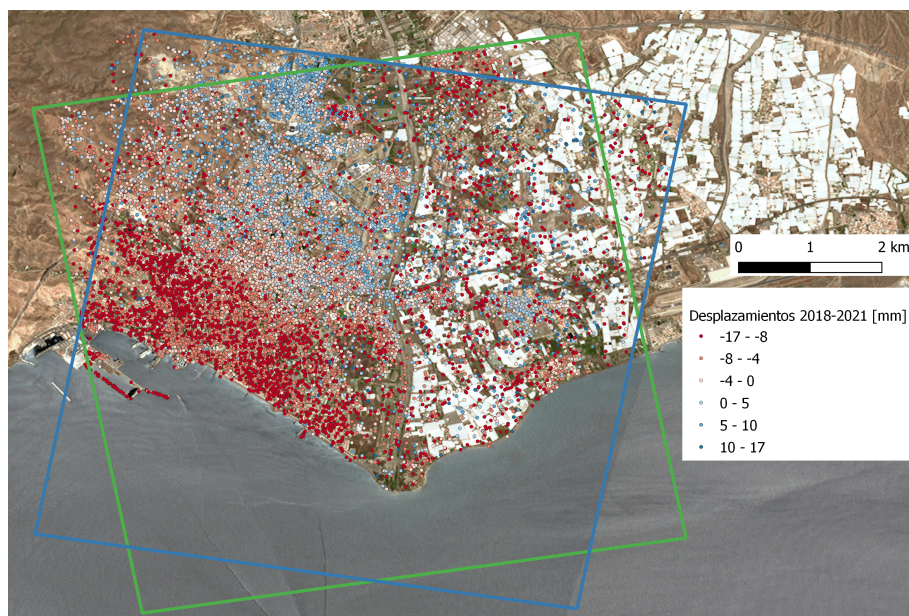


Figura 4.10 Desplazamientos 2018-2021 en Almería, en mm.

4.2 Correlación con la litología existente

Se ha estudiado la ascendencia o descendencia del terreno medidos mediante el análisis interferométrico realizado, así como su implicación con las formaciones geológicas existentes. En la siguiente tabla, aparece representado el número de puntos analizados correspondientes con cada una de las litologías existentes en los tres emplazamientos estudiados

Tabla 4.1 Resultados del análisis DinSAR obtenidos en las diferentes litologías existentes.

GRANADA						
	Litología	Nº pts	Subsidencia	Hinchamiento	% Subsid	% Hinch
1	Gravas	12051	5455	6596	45.27	54.73
2	Terreno Fluvial	12102	2612	9490	21.58	78.42
3	Calizas	3633	1790	1843	49.27	50.73
4	Areniscas	1865	726	1139	38.93	61.07

LORCA						
	Litología	Nº pts	Subsidencia	Hinchamiento	% Subsid	% Hinch
1	Conglomerados	9124	6837	2287	74.93	25.07
2	Gneis	2008	1201	807	59.81	40.19
3	Dolomías	1172	707	465	60.32	39.68

ALMERÍA						
	Litología	Nº pts	Subsidencia	Hinchamiento	% Subsid	% Hinch
1	Gravas	7483	6568	915	87.77	12.23
2	Terreno fluvial	1565	715	850	45.69	54.31
3	Calizas	4287	2754	1533	64.24	35.76
4	Areniscas	610	331	279	54.26	45.74

De manera gráfica, en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se han representado los datos anteriormente tabulados, con el porcentaje de puntos medidos en cada dirección rotulado sobre las barras apiladas:

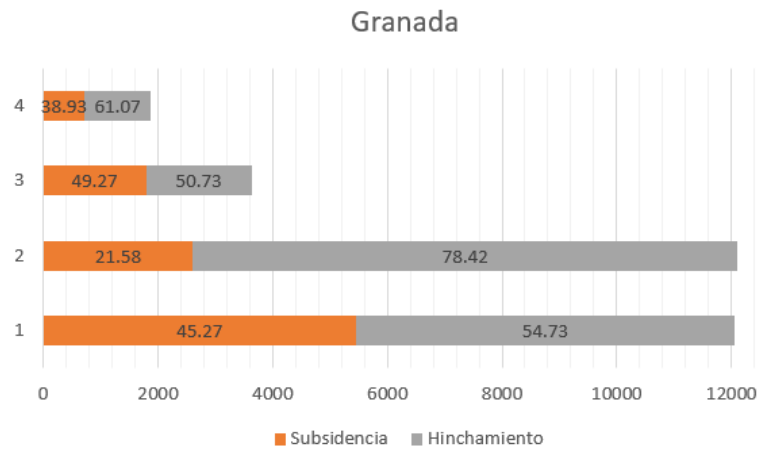


Figura 4.11 Puntos analizados bajo sobre los cuales existe subsidencia o hinchamiento en la ciudad de Granada.

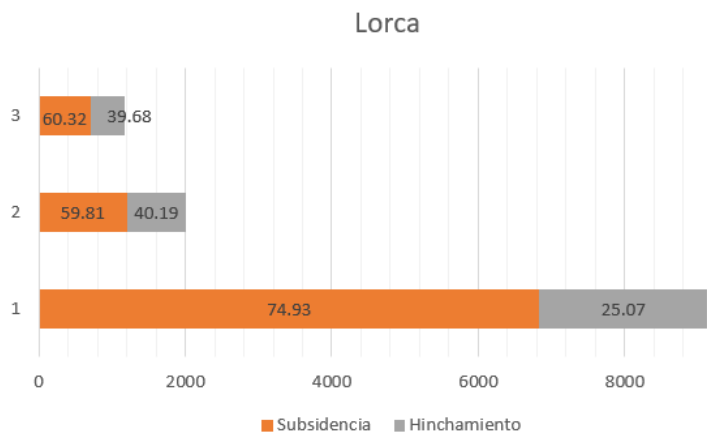


Figura 4.12 Puntos analizados bajo sobre los cuales existe subsidencia o hinchamiento en la ciudad de Lorca.

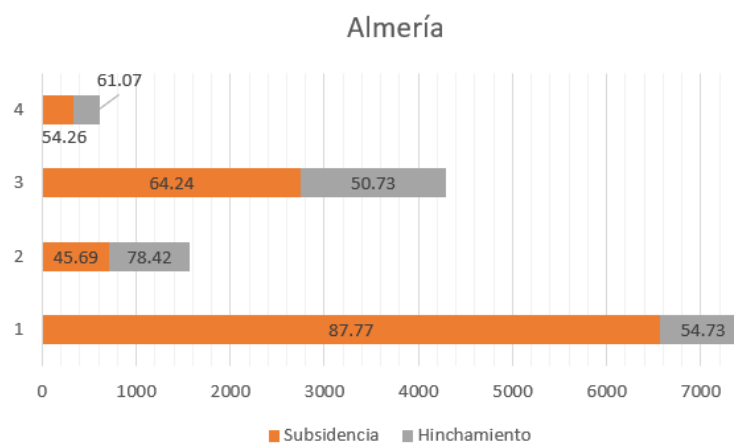


Figura 4.13 Puntos analizados bajo sobre los cuales existe subsidencia o hinchamiento en la ciudad de Almería.

Además, en las siguientes imágenes (Figuras 4.14, 4.15 y 4.16), se han representado las diferentes litologías junto con los desplazamientos medidos mediante radar:

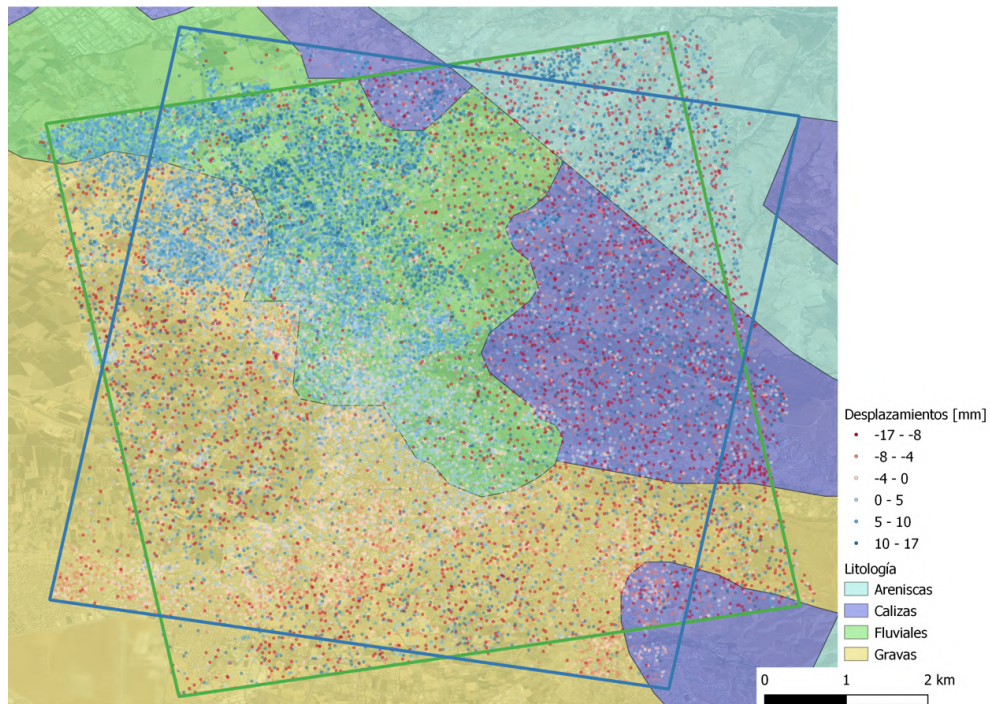


Figura 4.14 Georrepresentación de los desplazamientos medidos entre 2018 y 2021 sobre las litologías en Granada.

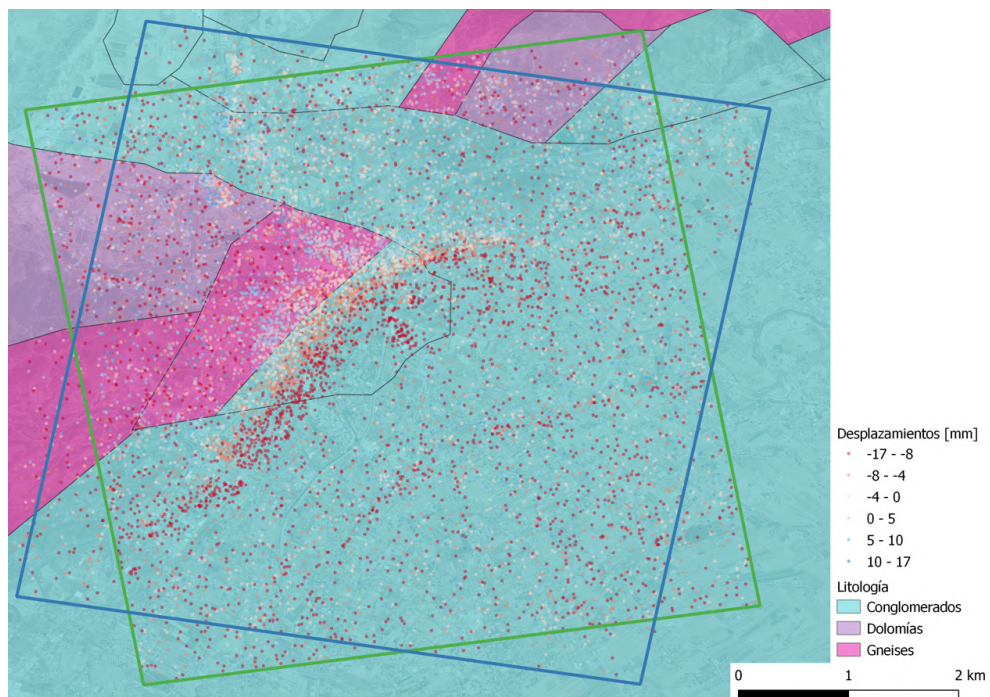


Figura 4.15 Georrepresentación de los desplazamientos medidos entre 2018 y 2021 sobre las litologías en Lorca.

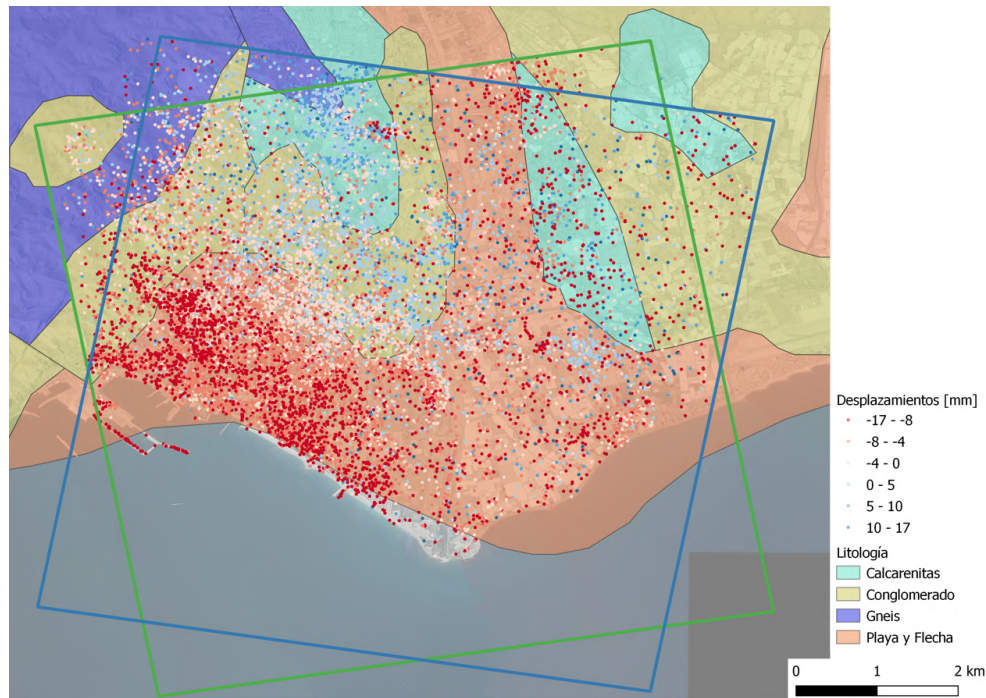


Figura 4.16 Georrepresentación de los desplazamientos medidos entre 2018 y 2021 sobre las litologías en Almería.

Es entonces cuando se han agrupado los datos y se han representado los histogramas de frecuencias correspondientes en las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19:

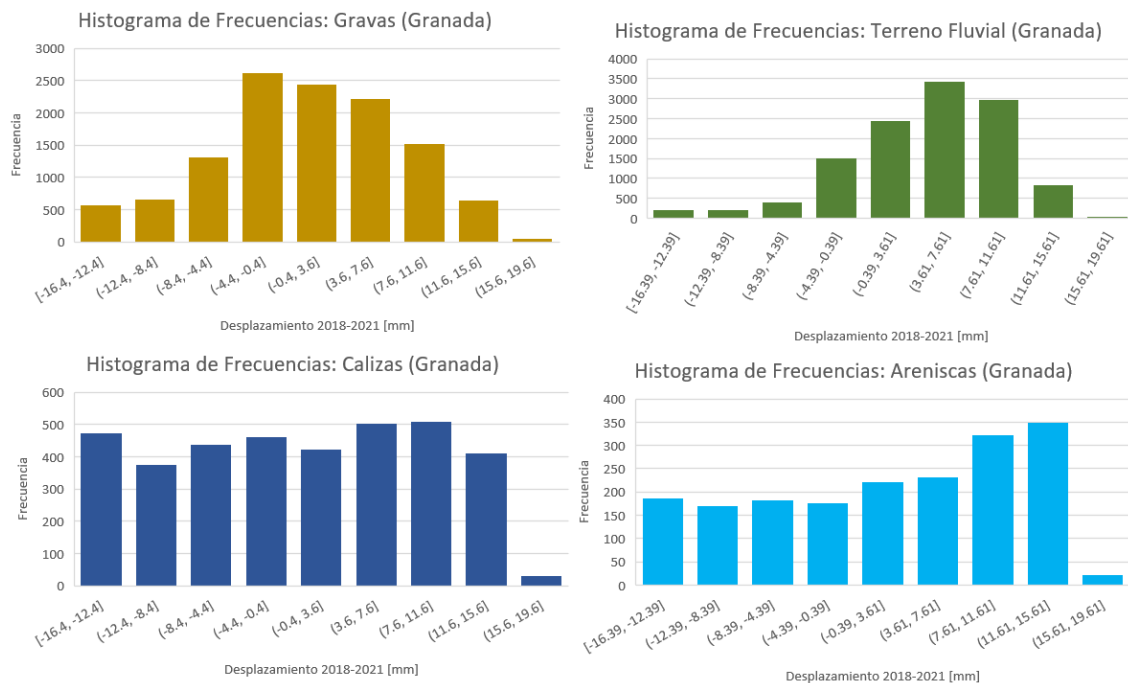


Figura 4.17 Histograma de frecuencias de desplazamientos medidos clasificados según cada una de las litologías presentes en la ciudad de Granada.

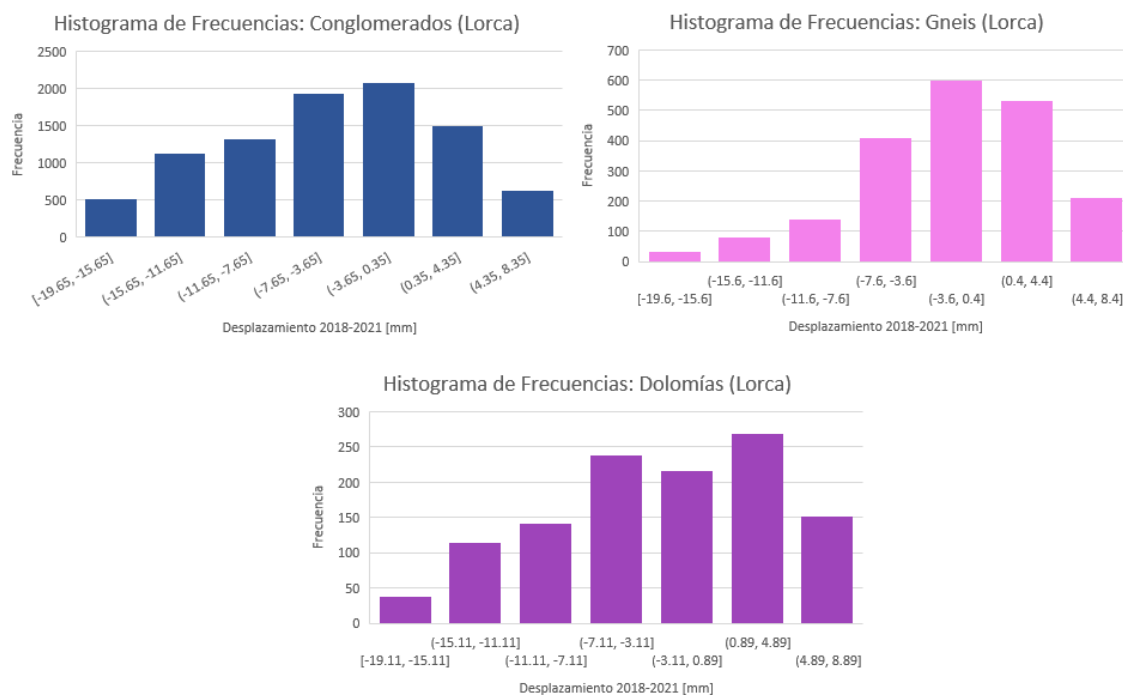


Figura 4.18 Histograma de frecuencias de desplazamientos medidos clasificados según cada una de las litologías presentes en la ciudad de Lorca.

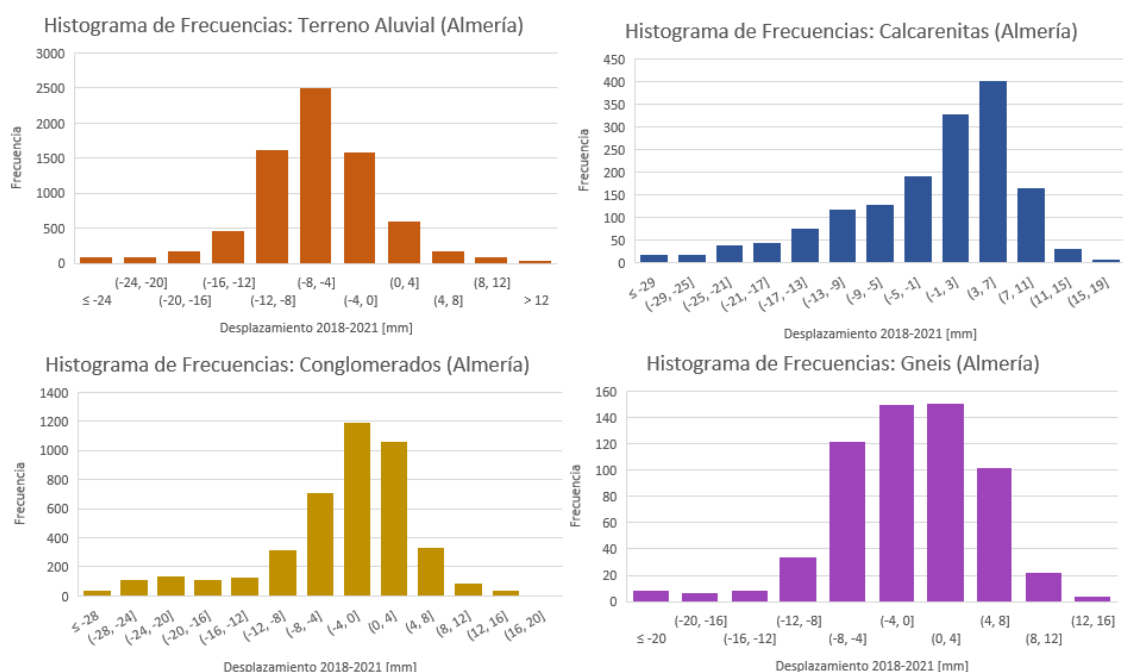


Figura 4.19 Histograma de frecuencias de desplazamientos medidos clasificados según cada una de las litologías presentes en la ciudad de Almería.

Respecto a este análisis se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En la ciudad de Granada, se aprecia una agrupación de hinchamientos sobre las zonas de terrazas fluviales y marinas. Estas son pequeñas plataformas sedimentarias construidas en un valle fluvial por los propios sedimentos del río que se depositan a los lados del cauce en los lugares en los que

la pendiente del mismo se hace menor, con lo que su capacidad de arrastre también se hace menor (Cáceres, 2008).

- En el caso de Lorca, las zonas predominantes de gneises sufren un mayor hinchamiento, mientras que el área gobernada por conglomerados sufren la mayor cantidad de subsidencias, así como las más severas.
- En la ciudad de Almería se encuentran áreas de terreno aluvial de tipo playa y flecha a lo largo de la línea de costa, así como en el curso del Río Andarax. Debido a la consistencia de este material, las subsidencias se concentran en estas zonas, mientras que las áreas de conglomerado (en este caso, de tipo calizo) sufren la mayor parte de los hinchamientos.

4.3 Estudio de los resultados en función de la antigüedad y peso de las edificaciones

Se intentará obtener una correlación entre la antigüedad y el peso de la edificación sobre la que se proyecta cada nodo del análisis y la subsidencia ocurrida en el período comprendido entre 2018 y 2021.

Para esto, se ha utilizado una herramienta de gestión de datos vectoriales de QGIS que clasifica los datos obtenidos en SARPROZ según si se encuentran sobre alguna edificación reflejada en el Catastro INSPIRE, o si por el contrario, se encuentra sobre el terreno o la calzada. Para ello se ha empleado un campo binario titulado "EDIFICADO", el cual genera un 0 en los puntos que no se encuentran posicionados sobre una edificación y un 1 para el caso contrario. Para incorporar ambos parámetros al análisis, se seguirá la siguiente metodología:

- La antigüedad (A) del edificio se representará de manera directa en el número de años existentes entre su edificación y el 2021.
- El peso (W) de las edificaciones se ha obtenido como un valor de volumen, producto entre el área y la altura total tanto sobre como bajo el terreno. Para este estudio se considerará un valor nominal de densidad media de la edificación en función de su volumen.
- Por último, para relacionar ambas, se define el parámetro λ como el cociente entre el volumen y la antigüedad de las edificaciones, normalizado a la unidad, como se define en la ecuación 4.1.

$$\lambda = \left(\frac{W}{A} \right) \cdot \frac{1}{\max(W/A)} \quad (4.1)$$

Se presentan en las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 la extracción de puntos sobre edificaciones en cada uno de los tres emplazamientos:

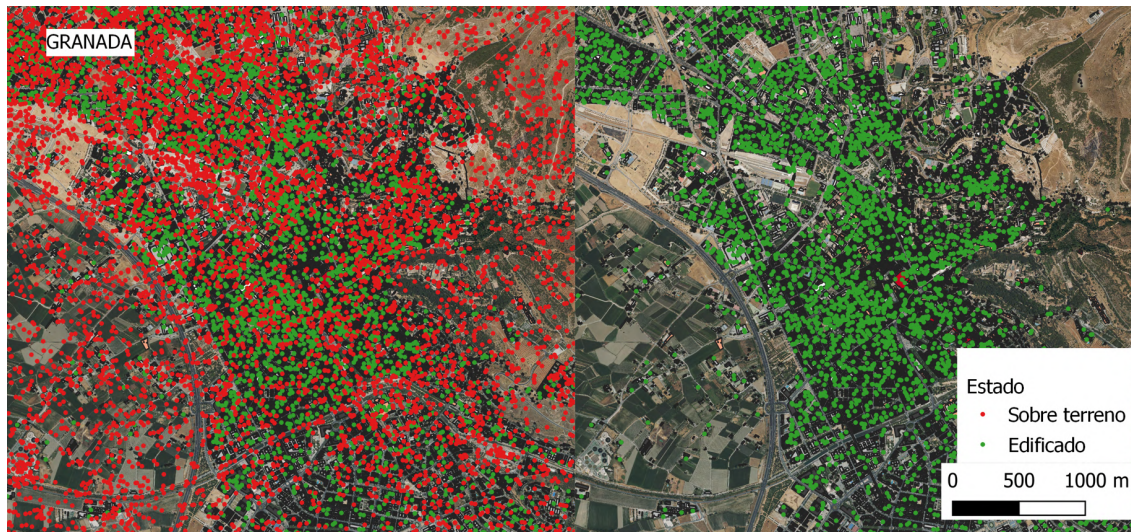


Figura 4.20 Extracción de puntos sobre edificaciones en la ciudad de Granada.

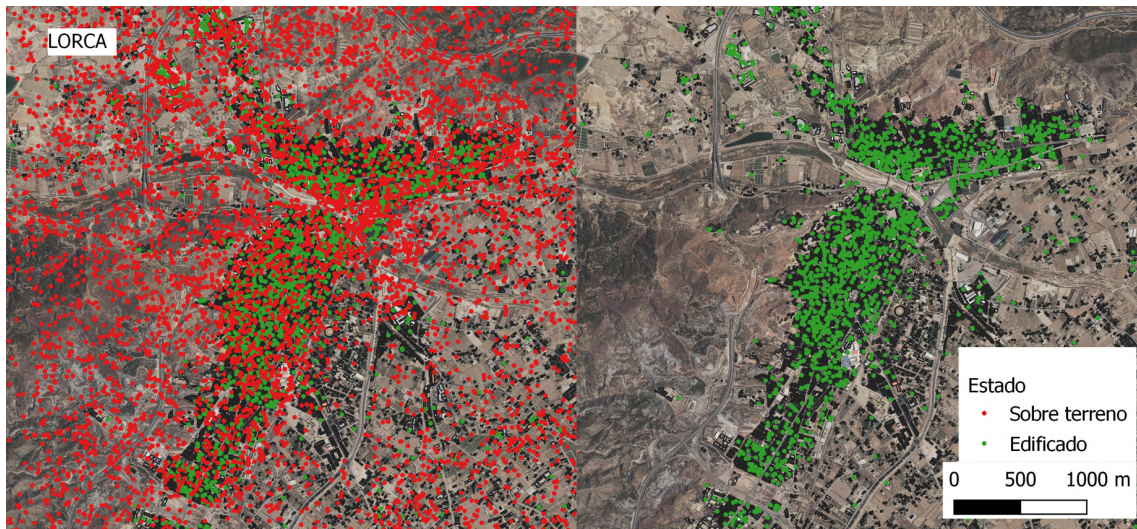


Figura 4.21 Extracción de puntos sobre edificaciones en la ciudad de Lorca.



Figura 4.22 Extracción de puntos sobre edificaciones en la ciudad de Almería.

Estos puntos extraídos han sido analizados para intentar encontrar una correlación entre la subsidencia o hinchamiento sufrido por las edificaciones y el parámetro λ previamente definido. Se han representado en las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25:

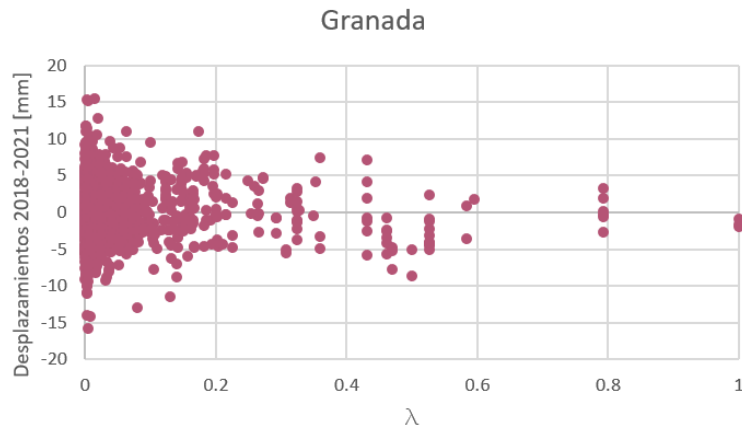


Figura 4.23 Nube de puntos relacionando la antigüedad y peso de las edificaciones con los movimientos del terreno que sufren en Granada.

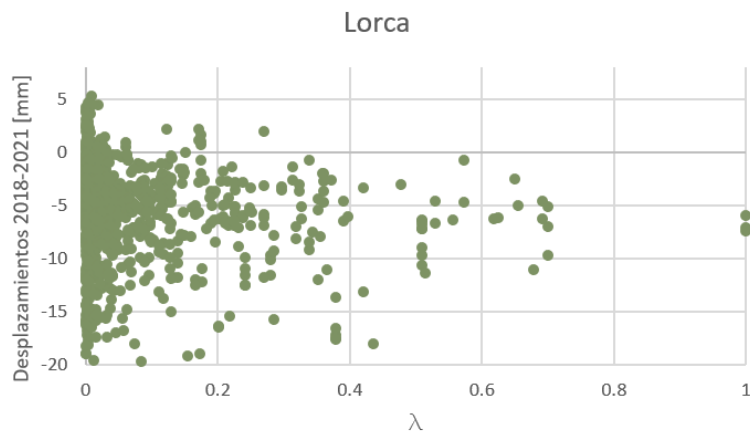


Figura 4.24 Nube de puntos relacionando la antigüedad y peso de las edificaciones con los movimientos del terreno que sufren en Lorca.

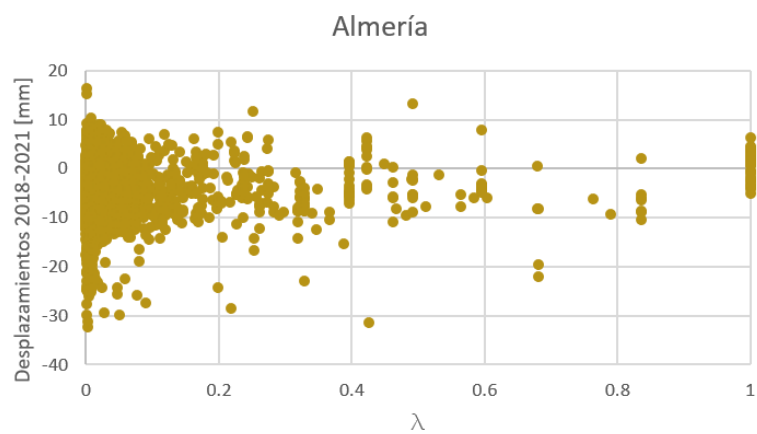


Figura 4.25 Nube de puntos relacionando la antigüedad y peso de las edificaciones con los movimientos del terreno que sufren en Almería.

Estudiando más a fondo las edificaciones más longevas, se adjuntan las siguientes gráficas en la Figura 4.26:

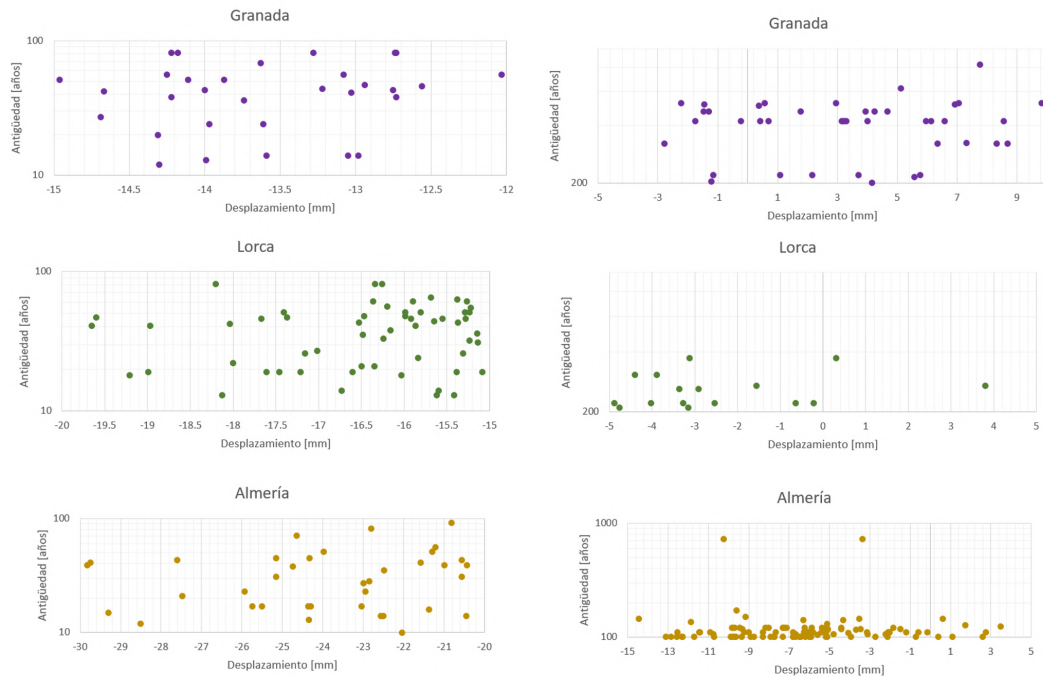


Figura 4.26 En la columna de la izquierda, las edificaciones que han sufrido mayor subsidencia. En la de la derecha, las edificaciones más antiguas.

Con esto se observan las siguientes conclusiones:

- En las tres localizaciones, las edificaciones que sufren mayor subsidencia son las que cuentan con una antigüedad comprendida entre 10 y 100 años. Aunque la mayor parte de edificaciones se encuentran dentro de este rango, y esto puede llevar a error en el estudio estadístico realizado, ya que podría ser la causa por la que los mayores valores se dan ahí, la gran cantidad de edificaciones de menos de 10 años quedan libres de estos valores tan altos.
- Las edificaciones más antiguas no siguen la misma correlación en las tres localizaciones.
 - Para la ciudad de Granada, existe una mayor cantidad de puntos que sufren hinchamiento que subsidencia. Esto puede ser debido a que, la zona centro, donde se hallan estos edificios, se encuentran sobre terrenos fluviales, donde las subsidencias son más escasas.
 - En el caso de Lorca, ocurre lo contrario. Salvo dos puntos de hinchamiento, el resto cuenta con problemas de subsidencia. Sin embargo, en ningún caso es mayor de 5 milímetros a lo largo de los tres años analizados.
 - En Almería ocurre algo parecido que en Lorca. Esta ciudad se caracteriza por la existencia de escasas edificaciones de gran antigüedad. Sin embargo, las subsidencias son mayores que en el caso anterior.

4.4 Tendencia del terreno y relación con la piezometría

Los descensos bruscos en las cotas piezométricas pueden propiciar subsidencias, como se ha visto reflejado en el artículo *Estudio de la ciudad de Murcia mediante Interferometría SAR diferencial avanzada. Tesis doctoral. Universidad de Alicante*, (Tomás 2008). Se han buscado puntos cercanos a los sondeos analizados para estudiar los desplazamientos sufridos a lo largo del período analizado para buscar una posible correlación.

En la Ciudad de Granada se han seleccionado los siguientes puntos, representados en la Figura 4.27:



Figura 4.27 Localización de la medición piezométrica y de los puntos obtenidos en SARPROZ que van a estudiarse en la Ciudad de Granada.

Para los cuales se ha estudiado la tendencia creciente o decreciente en cada incremento temporal de desplazamientos del terreno y se ha representado en la siguiente tabla:

Tabla 4.2 Desplazamientos del terreno en puntos cercanos al sondeo en la Ciudad de Granada.

Punto	Latitud	Longitud	Altura [m]	d 2018	d 2018-19	d 2018-20	d 2018-21	Tendencia
34931	37.15493	-3.58518	15.36	0	-1.89	-3.41	-4.71	
35584	37.15388	-3.58495	-6.50	0	0.22	-0.82	-0.86	
35585	37.15401	-3.58591	5.40	0	0.11	-1.33	-1.34	
35975	37.15340	-3.58610	-5.49	0	-4.03	-7.54	-11.06	
36223	37.15324	-3.58763	-2.15	0	-1.32	-4.13	-5.63	
36777	37.15183	-3.58407	9.65	0	-1.27	-4.02	-5.48	
36862	37.15170	-3.58405	1.25	0	0.72	-0.44	0.31	
37038	37.15163	-3.58535	4.81	0	0.71	2.27	1.86	
Tendencia Nivel Piezométrico Sondeo 1 (Granada: 05.32.928)								

Como puede observarse, la tendencia descendente en la mayoría de intervalos temporales confirma la teoría expuesta por Tomás en 2008. Los únicos puntos que han sufrido hinchamiento son los más alejados del sondeo, por lo que podemos despreciarlos para realizar la correlación. El nivel freático se encuentra íntimamente relacionado con la subsidencia o hinchamiento del terreno, siendo dependientes esta acción de las reacciones en materia de desplazamientos obtenidas.

Para la ciudad de Lorca se ha repetido el mismo procedimiento:



Figura 4.28 Localización de la medición piezométrica y de los puntos obtenidos en SARPROZ que van a estudiarse en la Ciudad de Lorca.

Tabla 4.3 Desplazamientos del terreno en puntos cercanos al sondeo en la Ciudad de Lorca.

Punto	Latitud	Longitud	Altura [m]	d 2018	d 2018-19	d 2018-20	d 2018-21	Tendencia
8849	37.66097	-1.66186	11.24	0	-0.5	-1.75	-3	
8853	37.66103	-1.66141	2.89	0	1.93	3.56	5.19	
8920	37.66119	-1.66110	7.43	0	1.68	2.33	6.98	
9071	37.66134	-1.66194	0.33	0	1.37	2.33	3.29	
9072	37.66140	-1.66148	13.24	0	1.45	1.48	3.51	
9305	37.66182	-1.66118	7.57	0	2.38	4.53	6.68	
9357	37.66177	-1.66258	20.00	0	1.49	1.89	2.29	
9361	37.66206	-1.66030	17.17	0	-2.07	-5.21	-8.35	
9648	37.66234	-1.66203	20.00	0	-1.32	-3.64	-5.96	
9651	37.66251	-1.66076	-8.86	0	-9.54	-6.21	-3.88	
9725	37.66255	-1.66137	-10.00	0	-0.09	2.65	5.39	
Tendencia Nivel Piezométrico Sondeo (Lorca: PA-12231)								

Donde se vuelve a confirmar los hechos, cumpliendo la tendencia ascendente esperada en la mayoría de puntos estudiados salvo en los más alejados del sondeo.

Y por último, en Almería:

**Figura 4.29** Localización de la medición piezométrica y de los puntos obtenidos en SARPROZ que van a estudiarse en la Ciudad de Almería.**Tabla 4.4** Desplazamientos del terreno en puntos cercanos al sondeo en la Ciudad de Almería.

Punto	Latitud	Longitud	Altura [m]	d 2018	d 2018-19	d 2018-20	d 2018-21	Tendencia
4393	36.83138	-2.43629	15.27	0	0.51	1.47	1.03	
4397	36.83165	-2.43440	-10.00	0	-0.87	-1.33	-3.19	
4513	36.83181	-2.43595	1.35	0	-3.26	-5.03	-7.42	
25997	36.83249	-2.43570	1.48	0	-3.19	-4.68	-7.6	
26072	36.83237	-2.43574	-3.31	0	1.75	4.29	4.46	
26158	36.83218	-2.43527	-0.81	0	-1.98	-4.31	-8.8	
26346	36.83204	-2.43608	20.00	0	-1.66	-4.81	-7.2	
26672	36.83154	-2.43618	20.00	0	-3.59	-8.64	-13.68	
26829	36.83126	-2.43596	20.00	0	-1.51	-6.01	-8.56	
26912	36.83096	-2.43477	-5.93	0	-0.9	-1.57	-4.4	
26990	36.83090	-2.43521	-6.88	0	-5.37	-11.1	-18.5	
Tendencia Nivel Piezométrico Sondeo (Almería)								

Nuevamente, salvo en dos situaciones (los puntos 4393 y 26072), se conserva la tendencia descendente junto al transcurso del período de estudio.

4.5 Análisis visual de datos correlacionados

Aunando las correlaciones expuestas en este capítulo, se obtienen las siguientes conclusiones:

- En Granada, la litología que sufre mayor subsidencia es la formada por terrenos fluviales. Además, las edificaciones allí situadas comienzan a sufrir subsidencias más severas con el tiempo, incrementándose a partir de los 10 años de antigüedad. Las construcciones sufren una mayor subsidencia de manera progresiva con respecto a su volumen (es decir, a su peso), con un máximo en edificaciones de unos 50.000 m^3 . La piezometría en el período de estudio tiene una tendencia descendente, fruto del descenso en las precipitaciones en etapas anteriores. Este hecho se ve reflejado en los desplazamientos en el terreno, de acorde con los valores obtenidos de la C.H. del Guadalquivir.
- Para Lorca, los conglomerados, en este caso clastosoportados en terraza fluvial y marina, cuentan con una gran tendencia subsidente. Las edificaciones de entre 10 y 100 años que cuentan con un volumen en torno a 60.000 m^3 sufren una mayor subsidencia. La piezometría en este caso ha sido ascendente, lo que se ve reflejado en los desplazamientos medidos.
- En el caso de Almería, los terrenos aluviales en el Delta del Río Andarax, así como la zona de playa, en edificaciones de entre 10 y 100 años con volúmenes mayores que en los otros dos casos (del orden de 80.000 m^3) cuentan con mayores valores de subsidencia. Además, la tendencia descendente vuelve a hacerse evidente en el estudio correlativo entre ambos parámetros.

Esto se resume en la tabla siguiente:

Tabla 4.5 Cuadro resumen de la correlación realizada.

		GRANADA	LORCA	ALMERÍA
Geología		Terrenos fluviales	Conglomerados / Terrazas fluviales y marinas	Aluvial / Playa
Edificaciones	Antigüedad	10-100 años	10-100 años	10-100 años
	Volumen	50.000 m3	60.000 m3	80.000 m3
Piezometría		Descendente	Ascendente	Descendente

5 Conclusiones

El presente estudio de subsidencias ha demostrado la simplicidad de la metodología DinSAR y su importante uso en el área de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Gracias tanto a las fuentes públicas de datos abiertos como a los softwares empleados en el cálculo y procesamiento de resultados, se ha podido desarrollar en su totalidad este estudio.

El conocimiento del hundimiento del terreno es de vital importancia para cualquier obra civil, y en determinadas zonas puede suponer un problema para la seguridad tanto estructural como personal. Es por esto que gracias a los desarrollos existentes en materia de teledetección, se podrá prever este problema y evitar situaciones desafortunadas en el futuro. Las subsidencias son riesgos que aparecen a muy largo plazo, mediante movimientos muy pequeños pero persistentes en el paso del tiempo, lo que las hace difíciles de identificar a simple vista pero que son capaces de generar catástrofes en zonas urbanas.

En el presente estudio, gracias a la información ofrecida por la ESA mediante su programa Copernicus, se han obtenido imágenes ópticas terrestres en tres zonas potencialmente peligrosas de sufrir este riesgo: Granada, Lorca y Almería, como se pudo observar en los artículos científicos analizados sobre este tema. Mediante el procesamiento de estas imágenes, las cuales han sido escogidas espaciadas en el tiempo, y mediante la interferometría diferencial aplicada sobre ellas, se han obtenido algunas conclusiones:

- Los estudios previos sobre los que se basaron este trabajo arrojaron datos concordantes con los obtenidos, los cuales han sido una continuación de lo nombrado. Las litologías de mayor tendencia de sufrir subsidencias son las terrazas aluviales, fluviales, y suelos granulares arenosos, como los bancos de arena en las playas y deltas. El orden de magnitud de la velocidad anual de las subsidencias permanece coherente con los estudios previos, del orden de 2 a 7 milímetros al año en Almería y de hasta 5 milímetros en Granada y en Lorca coinciden con los obtenidos en este análisis.
- La piezometría ha sido demostrada que guarda una estrecha relación con los desplazamientos del terreno, descendiendo cuando el acuífero baja su nivel y viceversa. La ausencia de terrenos expansivos puede suponer la causa de la proporcionalidad directa entre estos dos parámetros, ya que en el caso de que hubiese, un pequeño cambio en la humedad del suelo supondría un gran cambio en el volumen de las tierras.
- Por último, las edificaciones existentes, las cuales transmiten fuerzas verticales hacia abajo debidas al peso que transmiten al terreno, generan grandes subsidencias. Mientras que la antigüedad de estas edificaciones acentúan esta tendencia subsidente. Lo que es claro es que, el propio peso de las edificaciones nunca generarán hinchamientos en el terreno. Será la litología y la piezometría las que cuenten con una ponderación mayor en el caso de aumentos del nivel del terreno.

En definitiva, la posición de la superficie del terreno siempre queda supeditada a otros parámetros de enorme importancia, los cuales se pueden medir, parametrizar y correlacionar entre sí para el estudio de las subsidencias.

